Convergencia Mecatrónica

Solano J.C., Vázquez Ma. E. y Vargas J.E.

Convergencia Mecatrónica

1ª Edición

Solano Vargas J.C.
Vázquez Huerta Ma. E.
y Vargas Soto J. E.

“Convergencia Mecatrónica”

Solano Vargas Julio César
Vázquez Huerta Ma. Elena
Vargas Soto José Emilio

© Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
Prolongación Corregidora Norte No. 168, interior E
Col. El Cerrito, C.P. 76160, Querétaro, Qro.
México.

Internet: http://www.mecamex.net

1ª Edición, 22 de Octubre, 2024.

ISBN: 978-607-9394-30-1

Derechos reservados.
Esta obra es propiedad intelectual de sus autores y los derechos de publicación han sido legalmente transferidos a la editorial. Las opiniones y la información que se muestran en los capítulos del libro son exclusivas de los autores de cada capítulo y no representan la postura de la Asociación Mexicana Mecatrónica A.C. Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización por escrito del propietario de los derechos del copyright.

Impreso en México – Printed in Mexico

Convergencia Mecatrónica, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
ISBN: 978-607-9394-30-1, México, 2024

ÍNDICE

Capítulo 1 **1**
Validación de la Simulación Térmica Mediante el Método de los Elementos Finitos de Sólidos Primitivos
Candia García Filiberto, Escamilla Sánchez Juan Carlos, Escamilla Robles Mariam Guadalupe y García Sánchez Enrique Rafael.

Capítulo 2 **13**
Contador de Objetos en una Imagen Utilizando Fotogramas de Videos
Gabriela de Jesús López Ruiz, Rodolfo Romero Herrera y Laura Méndez Segundo.

Capítulo 3 **20**
Diseño de un Robot Afectivo Mediante Herramienta CAD
Rodolfo Romero Herrera, Gabriela de Jesús López Ruiz y Laura Méndez Segundo.

Capítulo 4 **33**
Propuesta de Desarrollo Técnico de un Serious Game Enfocado en la Nutrición Infantil
Ramirez Torres Julio Cesar, Santoyo Mora Mauro, Martínez Nolasco Juan José, Sandoval Salazar Cuauhtémoc y Torres Montoya Jazmín.

Capítulo 5 **47**
Diseño y Validación de un Robot Autónomo Limpiador de Playa
Reveles Martínez Rafael, Burciaga Sosa Sebastián, Hernández Esquivel Jorge Eduardo, Romo Castañeda Francisco Emiliano, Jaramillo Martínez Ramón y Moreno Castro Addried Samir.

Capítulo 6 **59**
Diseño de Dispositivo para Prevención del Síndrome de Muerte Súbita del Lactante Aplicando la Metodología de Diseño Mecatrónico
Ana Jasive Flores Duarte, Fernando Jassiel Castañón Hernández, Ramón Jaramillo Martínez, Jorge Talavera Otero, Umanel Azazael Hernández González y Flabio Dario Mirelez Delgado.

Convergencia Mecatrónica, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
ISBN: 978-607-9394-30-1, México, 2024

ÍNDICE

Capítulo 7 **78**
Diseño y Desarrollo de un Prototipo de Cámara de Crecimiento Vegetal
Guerrero Sánchez Jacqueline, Guerrero Flores José Rosario, Olvera Olvera Carlos Alberto, Solís Sánchez Luis Octavio, Martínez Blanco Ma. Del Rosario, Guerrero Osuna Héctor Alonso, López Martínez Manuel de Jesús y Díaz Flórez Germán.

Capítulo 8 **91**
Dispositivo Electrónico Inteligente para Medir el Consumo de Agua en el Sector Doméstico
Silva Rodríguez Guadalupe, Guerrero Osuna Héctor Alonso, Nava Pintor Jesús Antonio, Luque Vega Luis Fernando, Mata Romero Marcela Elizabeth y López Monteagudo Francisco Eneldo.

Capítulo 9 **108**
Análisis Comparativo de Antenas Helicoidales, Apertura Piramidal y de Parche Rectangular: Diseño, Rendimiento y Aplicaciones en IoT
Viramontes Ureño Selene, Guerrero Osuna Héctor Alonso, Martínez Blanco Ma. del Rosario, Rodríguez Abdalá Víctor Iván , Castañeda Miranda Rodrigo y Ornelas Vargas Gerardo.

Capítulo 10 **122**
Medidor de Nivel de Agua en Contenedores, Aplicando Internet de las Cosas (IoT)
Chávez Flores Iván Neftalí, Guerrero Osuna Héctor Alonso, García Vázquez Fabián, Díaz Flórez Germán, Solís Sánchez Luis Octavio y Olvera Olvera Carlos Alberto.

Capítulo 11 **139**
Caracterización de un Sistema de Lastre para un Minisubmarino
Barrales Romero Missael Eduardo, Flores Mena José Eladio, Michua Camarillo Antonio, Edy Flores Flores, Gutiérrez Arias Moisés y Morin Castillo Monserrat.

Capítulo 12 **154**
Modelo Discreto para Emular un Control en Modo Corriente Pico con HIL de Baja Latencia
López Molina Edgar, Sámano Ortega Víctor Manuel, Martínez Nolasco Juan José, Martínez Nolasco Coral y Santoyo Mora Mauro.

Convergencia Mecatrónica, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
ISBN: 978-607-9394-30-1, México, 2024

ÍNDICE

Capítulo 13 **168**
Sistema de Medición de Ritmo Cardíaco
Hernández Hernández Arturo, Becerra Rodríguez María
Blanca, Zea Pérez José Marcos, Dublan Barragán
Brenda Santa, Mata Donjuan Gloria Flor y Peredo Valderrama Iván.

Capítulo 14 **178**
Diseño de una Máquina Clasificadora de Tomate
Oscar Delgadillo González, Javier Bracamontes Bonilla,
Jorge Talavera Otero, Omar Désiga Orenday,
Flabio Darío Mirelez Delgado
y Umanel Azazael Hernández González.

Capítulo 15 **195**
Diseño de un Sistema Semiautomatizado de Visión Artificial para Control de Calidad Aplicado en Blíster de Pastillas
Paulina Ruby Jiménez Solís, Kevin Javier Prado Maldonado,
Umanel Azazael Hernández González, Jesús Álvarez Montufar
y Flabio Darío Mirelez Delgado.

Capítulo 16 **212**
Diseño de un Prototipo de Escáner-Copiadora de Documentos Braille
Domínguez Sánchez Sergio, Hernández González
Umanel Azazael, Mirelez Delgado Flabio Darío,
Chávez Almaraz Marlon, García Cruz Azalia Guadalupe
y Sánchez Luévano Abril Natalia.

Capítulo 17 **231**
Construcción y Control de Posición de un Robot Móvil Autónomo con ESP32
Loranca Gómez Sofia, Michua Camarillo Antonio, Bonilla Barranco
Héctor, García Sánchez Enrique Rafael, Fierro Rojas
Jorge Dionisio y Barrales Romero Missael.

Capítulo 18 **246**
Perceptrón Multicapa para el Seguimiento Colaborativo de Trayectorias de ROV en una Formación Líder-Seguidor con Comunicación no Afectiva
Pérez Alvarado Milton Eduardo, Gómez Espinosa Alfonso,
González García Josué, García Valdovinos Luis Govinda
y Salgado Jiménez Tomás.

ÍNDICE

Capítulo 19 **265**
Diseño y Construcción de un Módulo Didáctico con Controlador Lógico Programable y Robot Manipulador con 6 Grados de Libertad
Reveles Martínez Rafael, De La Torre Rivas Noé, López González Alejandro, Jaramillo Martínez Ramón, Ramírez Mora Javier y Morales Magallanes Humberto.

Capítulo 20 **288**
Dispositivo para la Monitorización de Salud Mental con Sensores de Bajo Costo
Mendoza Belmontes Mariana Lizeth, Vázquez Reyes Sodel, Guerrero Osuna Héctor Alonso, Velasco Elizondo Perla, Rodríguez Ruíz Julieta y Martínez Blanco Ma. Del Rosario.

Capítulo 21 **304**
BioAir: una Herramienta Móvil para el Acceso a Datos de la Calidad del Aire
Huerta Ordaz Juan Manuel y Hernández Zavala Antonio.

Capítulo 22 **323**
Prototipo de Guante APPC de Ayuda para Personas con Problemas de Comunicación
Frade Naja José Nathan, Quintanilla Martínez Erick Omar, Alejandre Flores Marisol, Hernández Oliva Noemi y Soto Hernández Bruce.

Capítulo 23 **339**
Construcción de un Sistema Robótico de Búsqueda y Monitoreo de Variables Fisiológicas
Peñaloza Mendoza Guillermo Rey, Flores Medina Pablo Jonatán, Becerra Tapia Víctor y Garibay Murillo Paola.

Capítulo 24 **350**
Desarrollo e Implementación de una Interfaz Gráfica para el Control del Movimiento de un Sistema de Depósito de Material para los Contactos de una Celda Fotovoltaica
Colorado Jiménez Guillermo, Mino Aguilar Gerardo, Moreno Coria Luis Armando y Arriaga Arriaga Cesar Augusto.

Convergencia Mecatrónica, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
ISBN: 978-607-9394-30-1, México, 2024

ÍNDICE

Capítulo 25 **363**
Validación del Diseño de un Robot Móvil Agrícola para la Detección de Zonas Dañadas en Cultivos de Frijol
Ruvalcaba Castro Edgar Ricardo, Escareño Fernández Luis Eduardo, Herrera Álvarez Israel, Ibarra Pérez Teodoro, Jaramillo Martínez Ramon y Reveles Martínez Rafael.

Capítulo 26 **380**
Diseño de una Interfaz Móvil para un Seguidor Solar
Cervantes Balbino Joan Abed, Domínguez Ramírez Yessica Vannesa, Ramos Arreguín Juan Manuel, Talavera Velázquez Dimas, Tovar Arriaga Saúl y Pedraza Ortega Jesús Carlos.

Capítulo 27 **395**
Puesta en Marcha de Torno CNC con SURFCAM
González Vázquez Luis Gabriel, Mojarro Magaña María, Venegas Moreno Juan José, Moreno Arango José Antonio y Obando Florián Jair Iván.

Capítulo 28 **413**
Propuesta Metodológica para Buenas Prácticas de Trabajo con Microcontroladores en el Aula
Ramos Arreguín Juan Manuel, Pedraza Ortega Jesús Carlos, Aceves Fernández Marco Antonio, Tovar Arriaga Saúl y Gorrostieta Hurtado Efrén.

Capítulo 29 **431**
Seguimiento Visual de Objetos Utilizando Algoritmos Basados en Filtros de Correlación
Hernández Hernández Beatriz, Rosales Silva Alberto Jorge y Sánchez Ramírez Edwards Ernesto.

Capítulo 30 **443**
Fusión de Sensores para Sistemas de Navegación Inercial Utilizando un Filtro Kalman Federado en Tiempo Real
Edwards Ernesto Sánchez Ramírez, Alberto Jorge Rosales Silva y Jorge Cerezo Sánchez.

Convergencia Mecatrónica, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
ISBN: 978-607-9394-30-1, México, 2024

ÍNDICE

Capítulo 31 **455**
Diseño de un Sistema de Visión Artificial para la Identificación de Larvas de Palomilla Dorso de Diamante en Cultivos de Brócoli
Muñoz Gutiérrez Raúl Antonio, Santoyo Mora Mauro, Martínez Nolasco Coral, Martínez Nolasco Juan José y Guevara Acevedo Luis Patricio.

Capítulo 32 **467**
Evaluación de Algoritmos de Predicción Aplicados en el Análisis de Temperaturas de un Cultivo de Lechuga en Invernadero
Figueroa Martínez Armando, Martínez Nolasco Coral, Martínez Nolasco Juan José, Santoyo Mora Mauro y Erazo Barradas Mauricio.

Capítulo 33 **482**
Alarma de Colisión Posicional con Celdas de Carga, Mediante el Módulo SIM808
Granados Albarrán Karina, Castillo Ventura Héctor y Cedillo Reyes Brenda Vanessa.

Capítulo 34 **499**
Sistemas IoT para Control Ambiental de una Cámara de Maduración para Jitomate
Alfaro Camacho Jonathan Ivan, Laguna Morales Juan Pablo, Rosas Landeros Brandon, Villegas García Jesús Salvador y Omar Josue Arzate Rivas.

Capítulo 35 **509**
Acondicionamiento de Señal para Sensor Temperatura en Sonda de Medición de Resistividad Térmica
Pérez Orozco Juan Adrián, Maganda Carvajal Jaime Alberto, Robles Vargas Juan Carlos, Zavala Domínguez María Sofia, Ramírez Reséndiz Miguel Ángel y Mejía Hernández Guillermo Eduardo.

Capítulo 36 **519**
Prototipo Reconfigurable de Microsatélite Meteorológico CanSat
Maganda Carvajal Jaime Alberto, Pérez Orozco Juan Adrián, Cervantes Gloria Omar, Mejía Hernández Guillermo Eduardo, Beltrán Medina Paulina Karely, Castillo Hipólito Astrid Onasis, Acevedo Avonce Diego Pablo, Alcantar Pérez Héctor Manuel y Rivera Díaz Mariana Isabel.

Convergencia Mecatrónica, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
ISBN: 978-607-9394-30-1, México, 2024

ÍNDICE

Capítulo 37 536
Modulo Didáctico Electroneumático Programable
Soto Hernández Bruce, Alejandre Flores Marisol, Sánchez Nájera Jesús Claudio, Loa Ramírez Luis Alberto, Hermoso Herbert Jimena Mariel y Olmos Solís David.

Capítulo 38 546
Exploración de Patrones Nodales de Arena en Placa Circular Mediante Solenoide
Castro López Angel Gustavo, Negrete Elizarraraz José Luis, Villaseñor Aguilar Marcos Jesús, Rostro González Horacio y Cano Lara Miroslava.

Capítulo 39 553
Diseño de Sistema Domótico con Visión Artificial para el Reconocimiento de Lengua de Señas Mexicanas
Enoc Isai Martinez Jimenez, Carlos Alberto Toro Arcila, Josué Gómez Casas, Jesús Salvador Galindo Valdés, Daniela Estefanía Ortiz Ramos, Oziel Gómez Casas, Jesús Fernando Martínez Villafañe y Carlos Rodrigo Muñiz Valdez.

Capítulo 40 567
Simulación de los Movimientos de un Robot Flexible Utilizando Actuadores Piezoeléctricos
Francisco Jesús Ramos García, Josué Gómez Casas, Esteban Guerra Bravo, Carlos Alberto Toro Arcila, Juan Carlos Anaya Zavaleta, Enoc Isai Martinez Jimenez, Jonathan Sebastian Obregón Flores, Juan Carlos Ortiz Cuellar y Oziel Gómez Casas.

Capítulo 41 583
Reingeniería de un Robot Industrial de Seis Grados de Libertad para su Aplicación en el Proceso GMAW
Jiménez Navarro Omar Alejandro, Gutiérrez Alvarado Fernanda Guadalupe, Gómez Casas Josué, Silva de León Marco Antonio, Hernández Flores Jorge Eduardo, Galindo Valdés Jesús Salvador y Muñiz Valdez Carlos Rodrigo.

Convergencia Mecatrónica, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
ISBN: 978-607-9394-30-1, México, 2024

ÍNDICE

Capítulo 42 **594**
App Móvil para Medición de Ángulos Biomecánicos en Rehabilitación en Casa: Innovación en Mecatrónica Médica
Alonso Alejandro Jiménez Garibay, José Guadalupe Uriel Palacios Campos, Yessica Joselin Palacios Mogica y María Dayana Pérez Ledesma.

Capítulo 43 **612**
Algoritmo para Procesamiento Auditivo de Pacientes con Hipoacusia en MATLAB
Díaz Carvajal Moisés Gustavo, Mateo Juárez Jorge, Palma Asunción Adilene y Sinuhé Ginés Palestino.

Capítulo 44 **623**
Adaptación del Método Paso a Paso para la Solución de Secuencias Electro Neumáticas en Sistemas Programables
Torres Báez Edgar Armando, Rangel Ramírez Gabriela, Flores García Efrén y Uriel Alejandro Luna Ávila.

Capítulo 45 **636**
Control de Altitud de un InnoSAT Mediante un Regulador Lineal Cuadrático Ajustado por Métodos Heurísticos
García Mejía Juan Fernando, Flores Fuentes Allan Antonio, Granda Gutierrez Efrén Everdardo, García Mejía José Antonio y Reyes Morales Rigoberto.

Capítulo 46 **650**
Diseño de un Modelo de Orden Reducido (ROM) para una Batería de Litio
Ibañez Olvera Mario, Jaramillo Sierra Bethsabet, Rivera Ramos Diana Isela, y Romero Arizmendi Julio César

Capítulo 47 **658**
Simulación Numérica de la Distribución Luminosa para una Calavera Trasera de un Automóvil
Ibañez Olvera Mario, Jaramillo Sierra Bethsabet, Rivera Ramos Diana Isela y Gonzalez Zepeda Rodrigo.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 1, pp. 1 - 12.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Validación de la Simulación Térmica Mediante el Método de los Elementos Finitos de Sólidos Primitivos

Candia García Filiberto[1], Escamilla Sánchez Juan Carlos[1], Escamilla Robles Mariam Guadalupe[1] y García Sánchez Enrique Rafael[1]

[1]Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
filiberto.candia@correo.buap.mx

Resumen

La simulación térmico-estructural mediante el uso de software libre para el análisis por elementos finitos (MEF) actualmente tiene un alto empuje y desarrollo por investigadores académicos. Por ello, se tiene como objetivo rediseñar las dimensiones geométricas de un sólido primitivo cubo digital-virtual, que compense la variabilidad volumétrica (incertidumbre dimensional) que ocurren en la transición del diseño a la fabricación. El trabajo utiliza el método científico y consiste en: diseñar de manera digital un cubo de dos centímetros por lado, que se imprime mediante el modelado por deposición fundida en una impresora 3D. Mediante el uso de software libre para la simulación y análisis por el MEF, se realiza una simulación térmico-estructural, evaluados en un estado estacionario. Los resultados se expresan como porcentajes de aproximación tanto de la ejecución experimental como de la simulación, con respecto a la solución analítica exacta. Se concluye que en el sector académico de las instituciones de educación superior deben expandir sus alternativas de simulación mediante la tecnología de la ingeniería asistida por computadora, hacia el software libre que cuenta con desarrolladores y soluciones informáticas de alta gama, con capacidad para incursionar en la innovación y desarrollo de nuevos productos.

Palabras clave: Análisis Térmico-Estructural, Método de los Elementos Finitos, Software Libre, Validación conceptual.

1. Introducción

La incertidumbre dimensional se entiende como la diferencia de medida de las dimensiones geométricas de un cuerpo; sólido, plano o de línea [1], [2], [3]. Este concepto existe entre la comparativa del diseño original digital-virtual de un producto (sólido primitivo) y el contraste con el mismo producto al ser fabricado. Asimismo, cuando el producto se somete a condiciones operativas (condiciones frontera) que involucran incrementos de temperatura, sus dimensiones tienen tendencia a la deformación: volumétrica, plana o lineal, por la propiedad física de la expansión térmica lineal o volumétrica.

La alta relevancia que involucra el análisis de la incertidumbre dimensional radica en que es una medida cuantitativa de la calidad del resultado de la medición dimensional durante el ensamble de vehículo terminado. Garantizar entre el diseño digital y el proceso de fabricación la repetitividad de un mismo valor permite que los resultados de medida sean comparados con otras referencias, especificaciones o normas, de manera que el producto sea uniforme con altos estándares de calidad de acabado final.

Los principales beneficios del uso del dimensionamiento geométrico son: la asignación de tolerancias máximas y el aseguramiento de que una parte del ensamble completo satisfaga los requerimientos funcionales y de intercambiabilidad, ayudando a reducir los costos de manufactura e inspección [4].

1.1 Ecuaciones para el cálculo de la dilatación térmica

Diversos autores [5], [6] han definido a la dilatación térmica como el alargamiento que experimenta la unidad de longitud de un cuerpo al elevar su temperatura en 1 °C, dependiendo del tipo de geometría del objeto al variar la temperatura ec. 1, esta dilatación puede ser:

$$\Delta T = (T_f - T_i) \tag{1}$$

Lineal al variar su longitud ec.1.

$$L_f = L_0(1 + \alpha \Delta T) \tag{2}$$

De superficie al variar su área ec.3.

$$A_f = A_0(1 + \gamma \Delta T) \tag{3}$$

Volumétrica al variar su volumen ec.4.

$$V_f = V_0(1 + \beta \Delta T) \tag{4}$$

La fuerza de dilatación o contracción en un cuerpo al variar la temperatura se determina mediante la ec. 5, que considera que un cuerpo se encuentra empotrado o fijo en uno de sus extremos y al expandirse bajo la acción de la temperatura ejerce una fuerza de reacción.

$$F = \alpha E A_0 \Delta T \tag{5}$$

La contracción lineal definida por la ec. 6 es la reducción porcentual de una dimensión lineal específica en un cuerpo, en relación con su tamaño original, como respuesta a una disminución en la temperatura. La diferencia en dimensión entre un cuerpo fundido en un molde frío y el molde mismo, al enfriarse el material, se expresa como un porcentaje de la dimensión original del molde. Para determinar el incremento de longitud por contracción se emplea la ec. 7.

$$Cl = 1 - \frac{L_f}{L_i} 100 = \% \tag{6}$$

$$\Delta L = L_{original} * Cl \tag{7}$$

Donde:

$\Delta T = Variación\ de\ la\ temperatura$
$T_i = Temperatura\ inicial$
$T_f = Temperatura\ final$
$L_0 = Longitud\ inicial\ antes\ de\ la\ dilatación$
$A_0 = Área\ inicial\ antes\ de\ la\ dilatación$
$V_0 = Volumen\ inicial\ antes\ de\ la\ dilatación$
$L_f = Longitud\ final\ despúes\ de\ la\ dilatación$
$A_f = Área\ final\ despúes\ de\ la\ dilatación$
$V_f = Volumen\ final\ despúes\ de\ la\ dilatación$
$\alpha = coeficiente\ de\ expansión\ térmica\ lineal$
$\gamma = coeficiente\ de\ expansión\ térmica\ de\ superficie$
$\beta = coeficiente\ de\ expansión\ térmica\ volumétrica$
$E = módulo\ de\ elásticidad\ del\ material$
$Cl = contracción\ lineal$
$L_f = longitud\ final\ del\ cuerpo\ (frío)$
$L_i = longitud\ inicial\ del\ cuerpo\ (caliente)$
$\Delta L = variación\ de\ la\ longitud$

La aplicación de la simulación térmico-estructural mediante el uso de software libre para el análisis por elementos finitos en fechas recientes ha tenido un alto empuje y desarrollo por emprendedores independientes. Que ofrecen la no dependencia de la academia de las grandes iniciativas privadas, para la comunicación, divulgación y difusión de las intenciones y avances de las universidades en cuanto a las actividades innovadoras de transferencia tecnológica.

Por ello, se tiene como objetivo rediseñar las dimensiones geométricas de un sólido primitivo (cubo digital-virtual), que compense la variabilidad (incertidumbre dimensional) del proceso de fabricación por modelado por deposición fundida (MDF) y por el fenómeno que sufre al ser sometido a una prueba experimental de incremento de temperatura. Como objetivo específico se encuentra el validar de manera analítica, experimental y por simulación numérica el desplazamiento que ocurre en un sistema didáctico de cubos de material no metálico, impresos mediante la técnica de MDF y que se someten a un proceso de transferencia de calor.

Los materiales utilizados para la fabricación por la técnica de modelado por deposición fundida fueron filamento de PLA y filamento de Fibra de Carbono (FC) con las siguientes características:

Ácido Poliláctico (PLA)

- Módulo de elasticidad – 4.0 GPa
- Módulo de Poisson – 0.38
- Conductividad térmica – 0.16 W/m°K
- Coeficiente de expansión térmica lineal – 6.8e-5 1/°K

Filamento fibra de carbono

- Módulo de elasticidad - 5.6 GPa
- Módulo de Poisson – 0.28
- Conductividad térmica – 0.72 W/m°K
- Coeficiente de expansión térmica lineal – 9e-5 1/°K

Los resultados se expresan como porcentajes de aproximación tanto de la ejecución experimental como de la simulación, con respecto a la solución analítica que se obtiene por el método exacto. Observando la alta factibilidad de uso y aplicación por parte de la academia de las soluciones informáticas que se ofertan como software libre en la plataforma Salome Meca.

2. Método

El método es experimental basado en el método científico y consiste en: diseñar de manera digital un cubo de dos centímetros por lado como dimensiones geométricas, que se imprime por MDF en una impresora 3D, empleando como material ácido poliláctico (PLA) de 1.75 mm y filamento de fibra de carbono de 1.75 mm. Una vez impreso el objeto de análisis se realizan mediciones de longitud, se somete de manera experimental a un incremento térmico y realizan nuevas mediciones para determinar las nuevas dimensiones por efecto de la expansión térmica. Mediante el uso de software libre para la simulación y análisis por el MEF, se realiza una simulación térmico-estructural que permite identificar los valores de desplazamiento, evaluados en un estado estacionario, la figura 1, muestra el procedimiento estructurado, donde resalta la documentación del estudio.

Con hojas de cálculo en el software Excel como herramientas para el análisis se documenta el proceso de análisis, permitiendo realizar operaciones de estadística básica y una comparativa porcentual. Como herramientas e instrumentos de: fabricación, medición e incremento de temperatura se utilizan:

- Un termómetro infrarrojo de la marca Fluke
- Un vernier digital de la marca Wenston Tools
- Una impresora 3D de la marca RAISE3D

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 1, pp. 1 - 12.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

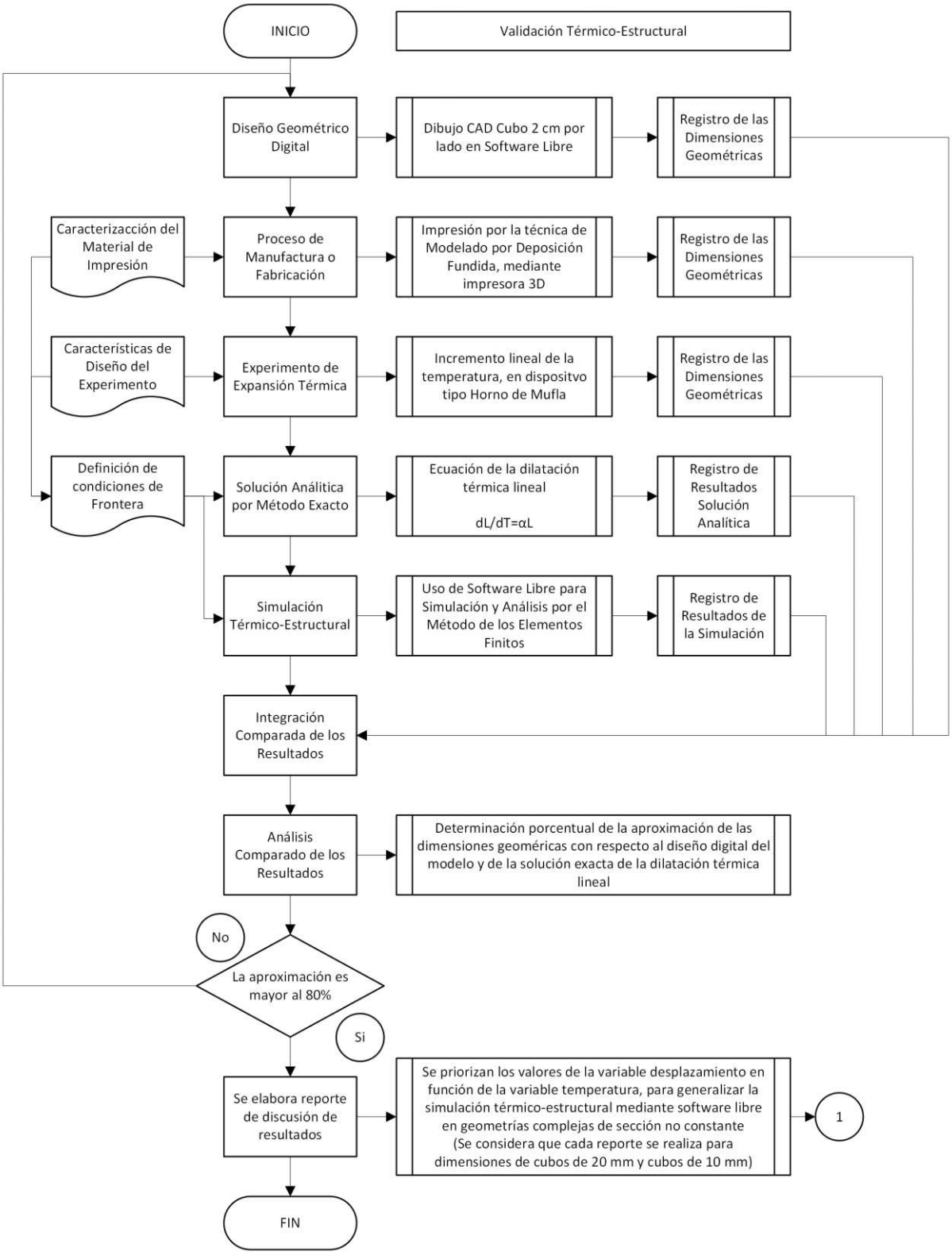


Figura 1. Procedimiento de validación de dilatación Térmico-Estructural.

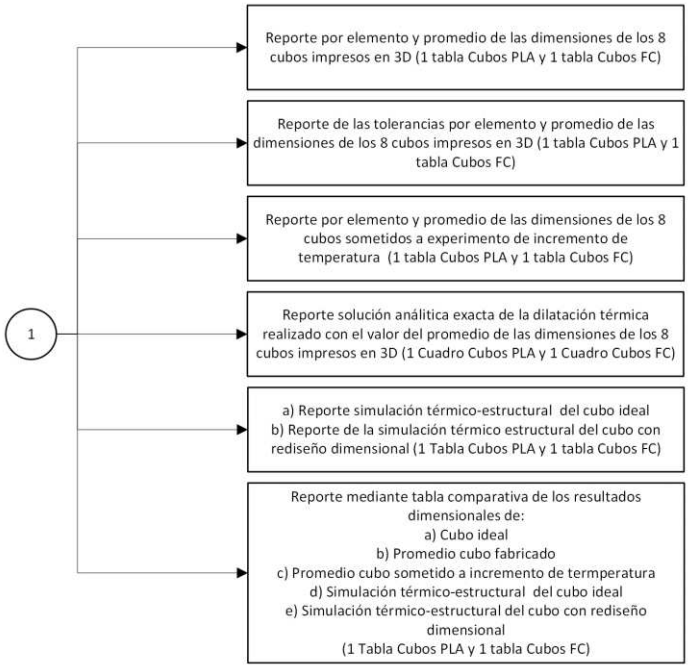


Figura 2. Subprocedimiento de elaboración de reporte.

3. Resultados

Se diseñaron por medio del CAD 8 cubos de 20 mm y 8 cubos de 10mm, tanto en material de filamento PLA como en filamento de fibra de carbono, y se ensamblaron para formar un nuevo cubo de 40 mm o 20 mm, de manera digital se diseñó una estructura-base para alojar el ensamble del nuevo cubo. Sin embargo, al fabricar por impresión 3D ambos modelos la variabilidad por contracción y expansión que sufre el material por la técnica de MDF, ocasiono que el ensamble fuera deficiente no pudiendo alojar los 8 cubos en la estructura base (ver figura 2 y figura 3). Por observación directa, se aprecia que la incertidumbre dimensional es mayor en la impresión con material que contiene fibra de carbono, con respecto al material de ácido poliláctico.

Figura 2. Estructura-base ensamblada con cubos, utilizando el filamento fibra de carbono.

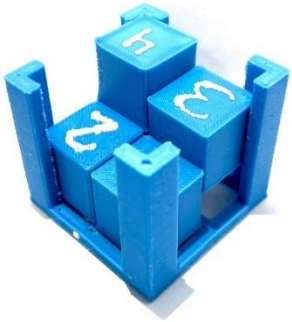


Figura 3. Estructura-base ensamblada con cubos, utilizando el filamento PLA.

Como resultado del análisis de las mediciones se observa que en los cubos de 20 mm que tienen mayores dimensiones la aproximación volumétrica es menos uniforme, para la impresión con material de PLA (tabla 1). Para el caso de material de filamento de fibra de carbono, el menor porcentaje de incertidumbre se observa en los cubos de 10 mm (tabla 2).

Tabla 1. 1. Análisis material filamento de PLA.

Dimensiones de los 8 cubos impresos en 3D			
Tabla Cubos PLA			
Cubos 10 mm			
No.	Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)
1	9.94	9.98	10.03
2	10.01	10.05	9.97
3	10.24	10.22	10.14
4	10.03	10.02	10.04
5	9.9	9.96	10
6	9.92	9.96	10
7	9.91	9.9	9.98
8	9.88	9.88	10
Promedio	9.98	10.00	10.02
Cubos 20 mm			
No.	Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)
1	19.93	19.88	19.91
2	19.81	19.66	20.09
3	19.89	19.9	19.89
4	19.92	19.98	20.05
5	19.9	19.87	19.99
6	20.02	19.79	20.03
7	20.05	19.95	19.87
8	20.02	19.89	19.93
Promedio	19.94	19.87	19.97
Cubo 10 mm	-0.21%	-0.04%	0.20%
Cubo 20 mm	-0.29%	-0.67%	-0.15%

Tabla 2. Análisis material filamento de fibra de carbono.

Dimensiones de los 8 cubos impresos en 3D			
Tabla Cubos Fibra de Carbono			
Cubos 10 mm			
No.	Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)
1	10.57	10.62	10
2	10.55	10.61	9.94
3	10.63	10.6	9.99
4	10.45	10.59	9.96
5	10.54	10.56	9.92
6	10.53	10.57	9.89
7	10.61	10.64	9.97
8	10.62	10.58	9.97
Promedio	10.56	10.60	9.96
Cubos 20 mm			
No.	Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)
1	20.54	19.78	20.58
2	20.61	20.52	19.7
3	20.55	20.46	19.73
4	20.61	20.53	19.7
5	20.5	20.59	19.67
6	20.5	20.57	19.65
7	20.48	20.56	19.76
8	20.3	20.44	19.69
Promedio	20.51	20.43	19.81
Cubo 10 mm	5.62%	5.96%	-0.45%
Cubo 20 mm	2.56%	2.16%	-0.95%

Tabla 3. Determinación de tolerancias utilizando el filamento PLA.

Tolerancias de las dimensiones de los 8 cubos impresos en filamento PLA									
Cubos 10 mm									
No.	Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)	% Ancho	% Largo	% Altura	Ancho a compensar	Largo a compensar	Alto a compensar
Cubo Ideal	10	10	10						
1	9.94	9.98	10.03	-0.60%	-0.20%	0.30%	-0.06	-0.02	0.03
2	10.01	10.05	9.97	0.10%	0.50%	-0.30%	0.01	0.05	-0.03
3	10.24	10.22	10.14	2.40%	2.20%	1.40%	0.24	0.22	0.14
4	10.03	10.02	10.04	0.30%	0.20%	0.40%	0.03	0.02	0.04
5	9.9	9.96	10	-1.00%	-0.40%	0.00%	-0.1	-0.04	0
6	9.92	9.96	10	-0.80%	-0.40%	0.00%	-0.08	-0.04	0
7	9.91	9.9	9.98	-0.90%	-1.00%	-0.20%	-0.09	-0.1	-0.02
8	9.88	9.88	10	-1.20%	-1.20%	0.00%	-0.12	-0.12	0
Promedio	9.98	10.00	10.02				-0.02	0.00	0.02
Rediseño de dimensiones							**9.98**	**10.00**	**10.02**
Cubos 20 mm									
No.	Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)	% Ancho	% Largo	% Altura	Ancho a compensar	Largo a compensar	Alto a compensar
Cubo Ideal	20	20	20						
1	19.93	19.88	19.91	-0.35%	-0.60%	-0.45%	-0.07	-0.12	-0.09
2	19.81	19.66	20.09	-0.95%	-1.70%	0.45%	-0.19	-0.34	0.09
3	19.89	19.9	19.89	-0.55%	-0.50%	-0.55%	-0.11	-0.1	-0.11
4	19.92	19.98	20.05	-0.40%	-0.10%	0.25%	-0.08	-0.02	0.05
5	19.9	19.87	19.99	-0.50%	-0.65%	-0.05%	-0.1	-0.13	-0.01
6	20.02	19.79	20.03	0.10%	-1.05%	0.15%	0.02	-0.21	0.03
7	20.05	19.95	19.87	0.25%	-0.25%	-0.65%	0.05	-0.05	-0.13
8	20.02	19.89	19.93	0.10%	-0.55%	-0.35%	0.02	-0.11	-0.07
Promedio	19.94	19.87	19.97				-0.06	-0.14	-0.03
Rediseño de dimensiones							**19.94**	**19.87**	**19.97**

La tabla 3 y tabla 4, corresponden a la determinación de las tolerancias correspondientes a considerar para fabricar por impresión 3D y técnica MDF la estructura para contener los cubos apilados. Es importante resaltar que los elementos impresos por filamento de fibra de carbono requieren de una mayor holgura con respecto a las dimensiones ideales.

Tabla 4. Determinación de tolerancias utilizando el filamento fibra de carbono.

Tolerancias de las dimensiones de los 8 cubos impresos en filamento fibra de carbono									
Cubos 10 mm									
No.	**Ancho (mm)**	**Largo (mm)**	**Altura (mm)**	**% Ancho**	**% Largo**	**% Altura**	**Ancho a compensar**	**Largo a compensar**	**Alto a compensar**
Cubo Ideal	10	10	10						
1	10.57	10.62	10	5.70%	6.20%	0.00%	0.57	0.62	0
2	10.55	10.61	9.94	5.50%	6.10%	-0.60%	0.55	0.61	-0.06
3	10.63	10.6	9.99	6.30%	6.00%	-0.10%	0.63	0.6	-0.01
4	10.45	10.59	9.96	4.50%	5.90%	-0.40%	0.45	0.59	-0.04
5	10.54	10.56	9.92	5.40%	5.60%	-0.80%	0.54	0.56	-0.08
6	10.53	10.57	9.89	5.30%	5.70%	-1.10%	0.53	0.57	-0.11
7	10.61	10.64	9.97	6.10%	6.40%	-0.30%	0.61	0.64	-0.03
8	10.62	10.58	9.97	6.20%	5.80%	-0.30%	0.62	0.58	-0.03
Promedio	10.56	10.60	9.96				0.56	0.60	-0.04
Rediseño de dimensiones							**10.56**	**10.60**	**9.96**
Cubos 20 mm									
No.	**Ancho (mm)**	**Largo (mm)**	**Altura (mm)**	**% Ancho**	**% Largo**	**% Altura**	**Ancho a compensar**	**Largo a compensar**	**Alto a compensar**
Cubo Ideal	20	20	20						
1	20.54	19.78	20.58	2.70%	-1.10%	2.90%	0.54	-0.22	0.58
2	20.61	20.52	19.7	3.05%	2.60%	-1.50%	0.61	0.52	-0.3
3	20.55	20.46	19.73	2.75%	2.30%	-1.35%	0.55	0.46	-0.27
4	20.61	20.53	19.7	3.05%	2.65%	-1.50%	0.61	0.53	-0.3
5	20.5	20.59	19.67	2.50%	2.95%	-1.65%	0.5	0.59	-0.33
6	20.5	20.57	19.65	2.50%	2.85%	-1.75%	0.5	0.57	-0.35
7	20.48	20.56	19.76	2.40%	2.80%	-1.20%	0.48	0.56	-0.24
8	20.3	20.44	19.69	1.50%	2.20%	-1.55%	0.3	0.44	-0.31
Promedio	20.51	20.43	19.81				0.51	0.43	-0.19
Rediseño de dimensiones							**20.51**	**20.43**	**19.81**

De acuerdo con los resultados obtenidos de la medición de las dimensiones longitudinales posterior al experimento de incremento de temperatura, se observó que si existe una dilatación volumétrica significativa en los cubos impresos en filamento de PLA y en filamento de fibra de carbono. Comparando los porcentajes de variación de los cubos impresos antes y después del incremento de temperatura con el filamento PLA, se nota que hay escaso aumento en la variación con respecto a los primeros datos (Tabla 5). Se identifica que la incertidumbre dimensional es mayor en la impresión con material que contiene fibra de carbono, con respecto al material de ácido PLA. Como resultado del análisis de las mediciones se observa que en los cubos de 20 mm que tienen menor proporcionalidad en las dimensiones la aproximación volumétrica es menos uniforme, para la impresión con material de PLA (tabla 1). Para el caso de material de filamento de fibra de carbono, el menor porcentaje de incertidumbre se observa en los cubos de 10 mm (tabla 2).

Las figuras 4, 5 y 6, muestran la toma de medición de las dimensiones geométricas por medio del vernier Wenston Tools. Las figuras 7, 8 y 9, se exponen como muestra de la toma de temperatura que se realizó a cada uno de los cubos que se sometieron a la prueba de incremento de temperatura. Con respecto al filamento de fibra de carbono, se identifica que existe un aumento más significativo en el porcentaje de variación con respecto a las dimensiones del cubo sin el incremento de temperatura (Tabla 6).

Figura 4. Imagen del vernier Wenton Tools, tomando lectura.

Figura 5. Toma de medición del cubo de fibra de carbono.

Figura 6. Toma de medición del cubo de PLA.

Tabla 5. Dimensiones de los cubos después del experimento de temperatura, utilizando el filamento PLA.

Dimensiones de los 8 cubos sometidos a incremento de temperatura			
Tabla Cubos PLA			
Cubos 10 mm			
No.	Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)
1	9.96	10	10.04
2	10.04	10.12	10.02
3	10.26	10.2	10.19
4	10.08	10.04	10.06
5	9.95	9.99	10.02
6	9.94	9.98	10.06
7	9.93	9.93	10.06
8	9.93	9.95	10.04
Promedio	10.01	10.03	10.06
	0.11%	0.26%	0.61%
Cubos 20 mm			
No.	Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)
1	20.03	19.98	20.03
2	19.87	19.77	20.16
3	19.97	19.97	20.06
4	20.02	19.98	20.09
5	19.94	19.87	20.11
6	19.88	19.98	20.16
7	20.12	20.04	20.09
8	19.95	20.14	19.94
Promedio	19.97	19.97	20.08
	-0.14%	-0.17%	0.40%
Cubo 10 mm	-0.21%	-0.04%	0.20%
	0.11%	0.26%	0.61%
Cubo 20 mm	-0.29%	-0.67%	-0.15%
	-0.14%	-0.17%	0.40%

Tabla 6. Dimensiones de los cubos después del experimento de temperatura, utilizando el filamento fibra de carbono.

Dimensiones de los 8 cubos sometidos a incremento de temperatura			
Tabla Cubos Fibra de Carbono			
Cubos 10 mm			
No.	Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)
1	10.64	10.66	10.01
2	10.62	10.69	9.96
3	10.67	10.72	10.09
4	10.63	10.65	10.1
5	10.58	10.62	9.92
6	10.59	10.64	9.96
7	10.63	10.68	10.08
8	10.58	10.59	10.04
Promedio	10.62	10.66	10.02
	6.18%	6.56%	0.20%
Cubos 20 mm			
No.	Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)
1	20.57	19.9	20.68
2	20.66	20.59	19.81
3	20.66	20.59	19.86
4	20.66	20.6	19.86
5	20.62	20.56	19.83
6	20.56	20.63	19.79
7	20.55	20.61	19.78
8	20.37	20.51	19.8
Promedio	20.58	20.50	19.93
	2.91%	2.49%	-0.37%
Cubo 10 mm	5.62%	5.96%	-0.45%
	6.18%	6.56%	0.20%
Cubo 20 mm	2.56%	2.16%	-0.95%
	2.91%	2.49%	-0.37%

Se observo que los resultados de la solución analítica para los cubos de filamento PLA cuando son sometidos a una temperatura, tienen una variación mayor los cubos de 20 mm que los de 10 mm. Esto se puede ver denotado en los volúmenes finales de los cubos fabricados (Tabla 7).

Figura 7. Imagen del termómetro infrarrojo Fluke, tomando lectura.

Figura 8. Toma de lectura del cubo de fibra de carbono.

Figura 9. Toma de lectura del cubo de PLA.

Tabla 7. Dimensiones de los cubos después del proceso analítico de temperatura, utilizando el filamento de PLA.

Dimensiones de los 8 cubos sometidos a incremento de temperatura fabricados con filamento PLA				
Cubos 10 mm				
No.	Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)	Temperatura (°K)
1	9.94	9.98	10.03	321.35
2	10.01	10.05	9.97	323.35
3	10.24	10.22	10.14	323.05
4	10.03	10.02	10.04	328.35
5	9.9	9.96	10	321.05
6	9.92	9.96	10	329.25
7	9.91	9.9	9.98	324.25
8	9.88	9.88	10	319.45
Promedio	9.97875	10.00	10.02	323.76
		Volumen inicial (293.15°K) (mm3)	Volumen Final (323.7625°K) (mm3)	Variación (%)
		999.50	1009.90	1.03
Cubos 20 mm				
No.	Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)	Temperatura (°K)
1	19.93	19.88	19.91	328.25
2	19.81	19.66	20.09	330.15
3	19.89	19.9	19.89	330.85
4	19.92	19.98	20.05	333.45
5	19.9	19.87	19.99	333.45
6	20.02	19.79	20.03	333.25
7	20.05	19.95	19.87	327.55
8	20.02	19.89	19.93	327.6
Promedio	19.9425	19.87	19.97	330.57
		Volumen inicial (293.15°K) (mm3)	Volumen Final (323.7625°K) (mm3)	Variación (%)
		7911.27	8007.36	1.20

Tabla 8. Dimensiones de los cubos después del proceso analítico de temperatura, utilizando el filamento fibra de carbono.

Dimensiones de los 8 cubos sometidos a incremento de temperatura fabricados con filamento fibra de carbono				
Cubos 10 mm				
No.	Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)	Temperatura (°K)
1	10.57	10.62	10	321.55
2	10.55	10.61	9.94	323.95
3	10.63	10.6	9.99	324.65
4	10.45	10.59	9.96	327.65
5	10.54	10.56	9.92	326.95
6	10.53	10.57	9.89	323.55
7	10.61	10.64	9.97	315.85
8	10.62	10.58	9.97	317.05
Promedio	10.56	10.60	9.96	322.65
		Volumen inicial (293.15°K) (mm3)	Volumen Final (323.7625°K) (mm3)	Variación (%)
		1114.19	1133.72	1.72
No.	Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)	Temperatura (°K)
1	20.54	19.78	20.58	323.75
2	20.61	20.52	19.7	328.85
3	20.55	20.46	19.73	327.45
4	20.61	20.53	19.7	325.25
5	20.5	20.59	19.67	317.75
6	20.5	20.57	19.65	328.85
7	20.48	20.56	19.76	328.15
8	20.3	20.44	19.69	325.45
Promedio	20.51	20.43	19.81	325.69
		Volumen inicial (293.15°K) (mm3)	Volumen Final (323.7625°K) (mm3)	Variación (%)
		8301.79	8405.42	1.23

Se observo en la tabla 9, que los resultados de la solución analítica de los cubos fabricados con filamento de fibra de carbono tienen una mayor expansión volumétrica, cuando más pequeña es la dimensión del sólido primitivo (cubo).

Tabla 9. Solución analítica de la expansión térmica: filamentos PLA y fibra de carbono.

Solución Analítica		
Material	**Dimensiones**	**Dilatación Térmica Volumétrica (mm3)**
PLA	Cubo 10mm	6.24E+00
	Cubo 20 mm	6.04E+01
Fibra de Carbono	Cubo 10mm	8.87E+00
	Cubo 20 mm	7.29E+01

Los datos que se obtuvieron al aplicar la fórmula de dilatación volumétrica a la geometría de los sólidos primitivos, indica cuál será su dilatación después de someterlos a un incremento de temperatura y como se comportarán las propiedades mecánicas de los materiales.

La tabla 10, presenta los resultados de la simulación térmico-estructural, que se ejecutaron en el software libre de simulación y análisis por el MEF Salome-Meca, empleando ambos materiales: filamentos de PLA y de fibra de carbono, para el cubo con geometría ideal, que proporciono el efecto de la dilatación lineal, que se impuso a cada uno de sus ejes.

Tabla 10. Resultados simulación térmico-estructural, material: filamento PLA.

Simulación Térmico-Estructural del cubo ideal		
Material	**Dimensiones**	**Dilatación Lineal 80°C (mm)**
PLA	Cubo 10mm	0.08
	Cubo 20 mm	0.16
Fibra de Carbono	Cubo 10mm	0.08
	Cubo 20 mm	0.16

La tabla 11, presenta los resultados de la simulación térmico-estructural, ejecutada en el software salome-meca para filamentos de PLA y fibra de carbono ahora con el rediseño dimensional generando cambios en los valores de la dilatación para cada uno de los cubos, permitiendo contar con una referencia para realizar los ajustes necesarios a la estructura de contención para un mejor resultado por aproximación geométrica.

Tabla 11. Resultados simulación térmico-estructural, material: filamento de fibra de carbono.

Simulación Térmico-Estructural del cubo con rediseño dimensional		
Material	**Dimensiones**	**Dilatación Lineal (mm)**
PLA	Cubo 10mm	0.08
	Cubo 20 mm	0.16
Fibra de Carbono	Cubo 10mm	0.08
	Cubo 20 mm	0.16

Las figuras 10 y 11 son ejemplos de los resultados de la simulación térmico-estructural realizadas en el Software Salome Meca.

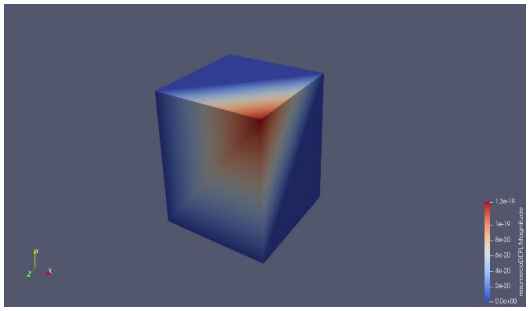


Figura 10. Simulación del cubo de PLA en Salome-Meca.

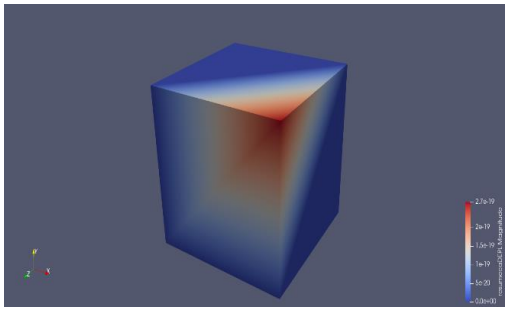


Figura 11. Simulación del cubo de Fibra de carbono en Salome-Meca.

4. Discusión

Analizando los resultados obtenidos en la tabla 12, se puede notar que las dimensiones de cada una de las etapas se acercan en menor o mayor medida al cubo ideal. Los cubos fabricados con filamento de PLA están altamente aproximados de las dimensiones ideales, lo que sugiere que el material tiene un buen comportamiento ante la contracción que se genera por los cambios de temperatura. En el filamento de fibra de carbono se encuentra una mayor variación especialmente en el ancho y largo, que indican que este tiene una mayor sensibilidad a los cambios térmicos.

Tabla 12. Concentrado de la comparativa de los resultados dimensionales de cada etapa del estudio.

Tabla comparativa de los resultados lineales dimensionales			
PLA			
Cubo 10mm	**Ancho (mm)**	**Largo (mm)**	**Altura (mm)**
Cubo Ideal	10	10	10
Promedio cubo fabricado	9.98	10.00	10.02
Promedio cubo sometido a incremento de temperatura	10.01	10.03	10.06
Simulación térmico-estructural del cubo ideal	10.08	10.08	10.08
Simulación térmico-estructural del cubo con rediseño dimensional	10.07	10.07	10.07
Cubo 20mm	**Ancho (mm)**	**Largo (mm)**	**Altura (mm)**
Cubo Ideal	20.00	20.00	20.00
Promedio cubo fabricado	19.94	19.87	19.97
Promedio cubo sometido a incremento de temperatura	19.97	19.97	20.08
Simulación térmico-estructural del cubo ideal	20.16	20.16	20.16
Simulación térmico-estructural del cubo con rediseño dimensional	20.15	20.15	20.15
Fibra de Carbono			
Cubo 10mm	**Ancho (mm)**	**Largo (mm)**	**Altura (mm)**
Cubo Ideal	10.00	10.00	10.00
Promedio cubo fabricado	10.56	10.60	9.96
Promedio cubo sometido a incremento de temperatura	10.62	10.66	10.02
Simulación térmico-estructural del cubo ideal	10.08	10.08	10.08
Simulación térmico-estructural del cubo con rediseño dimensional	10.07	10.07	10.07
Cubo 20mm	**Ancho (mm)**	**Largo (mm)**	**Altura (mm)**
Cubo Ideal	20.00	20.00	20.00
Promedio cubo fabricado	20.51	20.45	19.81
Promedio cubo sometido a incremento de temperatura	20.58	20.50	19.93
Simulación térmico-estructural del cubo ideal	20.16	20.16	20.16
Simulación térmico-estructural del cubo con rediseño dimensional	20.16	20.16	20.16

En la tabla comparativa 13, que muestran los resultados volumétricos dimensionales, se observa la diferencia que hay entre el cubo fabricado por impresión 3D y sometido a un experimento de incremento de temperatura versus los resultados de la solución analítica. Esta comparativa permite notar que existe una mínima variación de los volúmenes de los dos resultados comparados, corroborando que la información del estudio de la expansión térmica es coherente y aceptable en una toma de decisiones que refiera un caso de incertidumbre dimensional.

Tabla 13. Concentrado de la comparativa de los resultados volumétricos dimensionales.

Tabla comparativa de los resultados volumétricos dimensionales	
PLA	
Cubo 10mm	**Volumen (mm3)**
Cubo fabricado sometido a incremento de temperatura	1010.06
Cubo fabricado con resultado de la solución analítica	1007.76
Cubo 20mm	**Volumen (mm3)**
Cubo fabricado sometido a incremento de temperatura	8007.36
Cubo fabricado con resultado de la solución analítica	7991.03
Fibra de Carbono	
Cubo 10mm	**Volumen (mm3)**
Cubo fabricado sometido a incremento de temperatura	1133.72
Cubo fabricado con resultado de la solución analítica	1123.07
Cubo 20mm	**Volumen (mm3)**
Cubo fabricado sometido a incremento de temperatura	8405.42
Cubo fabricado con resultado de la solución analítica	8306.43
Variación entre la solución analítica e incremento de temperatura	**%**
Cubo PLA 10 mm	0.23
Cubo PLA 20 mm	0.2
Cubo Fibra de Carbono 10 mm	0.94
Cubo Fibra de Carbono 20 mm	1.18

5. Conclusiones

Se concluye que en el sector académico de las instituciones de educación superior deben expandir sus alternativas de simulación mediante la tecnología de la ingeniería asistida por computadora

(CAE), hacia el software libre que cuenta con desarrolladores y soluciones informáticas de alta gama, con capacidad para incursionar en la innovación y desarrollo de nuevos productos.

Validar los resultados de la simulación térmico-estructural, es un requerimiento indispensable que los profesionistas dedicados al diseño, fabricación, manufactura o ensamble de la industria metalmecánica deben ejecutar con alto dominio. El grado de dominio para disminuir o minimizar la incertidumbre dimensional es deseable como desempeño ocupacional medio alto, debido a que el área de calidad que supervisa los procesos de ensamble de vehículo completo o de innovación y desarrollo de nuevos productos, requiere de información de ingeniería que respalde la toma de decisiones para la liberación del producto dentro de los indicadores normativos vigentes.

Controlar la incertidumbre dimensional en los procesos productivos, es un calificador de eficiencia dentro de la productividad, que requiere de una evaluación continua de los parámetros de diseño y las condiciones de fabricación. Por ello, la simulación térmico-estructural con apoyo de software libre es una herramienta que debe extender su uso y aplicación tanto en la academia como en el sector productivo. Para ello es necesario que se desarrollen habilidades de análisis de las variables: esfuerzo, deformación y desplazamiento, asociadas a diversas condiciones operativas de temperatura, identificando las mejores estrategias de control para las variaciones de longitud no deseadas de incertidumbre dimensional.

La evidencia documentada ha permitido explorar que existe una deficiencia de datos en cuanto a los nuevos materiales que han sido desarrollados para la industria metalmecánica, ocasionando que la aproximación entre la información de diseño y la información de la simulación tenga baja aproximación. Como trabajo futuro se realizará la caracterización de los materiales de manera experimental para optimizar los resultados de las simulaciones térmico-estructurales.

Referencias

[1] CENAM, «Guía Técnica de Trazabilidad Metrológica e Incertidumbre de Medida en Metrología Dimensional,» 2013. [En línea]. Available: https://www.ema.org.mx/descargas_portalV2/guias_tecnicas/Guias_Tecnicas_CALIBRACION/CALIBRACION_Metrologia_dimensional.pdf. [Último acceso: 23 Agosto 2024].
[2] ASME, ASME Y14.5-2018: Dimensioning and Tolerancing: 8.2, ANSI, 2019.
[3] UNE, Especificación geométrica de productos (GPS). Tolerancia geométrica. Tolerancias de forma, orientación, localización y alabeo (ISO 1101:2017), UNE, 2017.
[4] D. Martínez, «Dimensionado y Tolerado Geométrico (GD&T),» 2018. [En línea]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnhttps://www.skolarium.com/wp-content/uploads/2020/07/GDT-I-PRINCIPIOS-FUNDAMENTALES-PG-201228.pdf. [Último acceso: 23 agosto 2024].
[5] Y. Cengel y A. Ghajar, Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico, Mc Graw Hill, 2011.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 2, pp. 13 - 19.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Contador de Objetos en una Imagen Utilizando Fotogramas de Videos

Gabriela de Jesús López Ruiz, Rodolfo Romero Herrera y Laura Méndez Segundo

Escuela Superior de Cómputo del Instituto politécnico Nacional
rromeroh@ipn.mx

Resumen

El texto describe una aplicación de redes neuronales artificiales (RNA), con un enfoque particular en el procesamiento de imágenes. Estas redes, inspiradas en el funcionamiento del cerebro, han sido ampliamente utilizadas en trabajos como segmentación, detección de bordes, y clasificación de imágenes, siendo el Perceptrón Multicapa (MLP), las Redes Neuronales Convolucionales (CNN), y la teoría de Resonancia Adaptativa (ART) algunas de las arquitecturas consideradas. El texto también menciona el empleo de una herramienta específica para el procesamiento de imágenes, que se organizan en niveles de pre procesamiento, segmentación, detección de objetos, y análisis de imagen. Finalmente, se empleó la familia de redes YOLO, la cual destacada por su velocidad en la localización de objetos en tiempo real, y se describe el proyecto que utiliza YOLO para clasificar como ejemplo vehículos en un conjunto de datos de imágenes en tiempo real, logrando una predicción del 80% en la detección y conteo.

Palabras clave: Reconocimiento de objetos, vehículos, redes neuronales, inteligencia artificial.

1. Introducción

Los modelos de redes neuronales artificiales (ANN) han ganado protagonismo en las últimas décadas, atribuido a diversos marcos teóricos sobre los mecanismos operativos de las redes neuronales biológicas. Posteriormente, se han propuesto multitud de iniciativas para implementar las ANN en varios ámbitos de la ingeniería. Estas redes encuentran muchas aplicaciones en el procesamiento de imágenes, donde las ANN se emplean para una varias de tareas. Numerosas modificaciones y contribuciones han arrojado una amplia gama de resultados [1].

2. Estado del Arte

Durante la década anterior, los marcos arquitectónicos de las redes neuronales empleadas para el procesamiento de imágenes han sufrido transformaciones significativas [2]. El perceptrón multicapa (MLP), las redes neuronales oscilatorias (ONN), las redes neuronales acopladas a pulsos (PCNN), las redes neuronales recurrentes (RNN), las redes neuronales basadas en modelos probabilísticos (RPNN), las redes neuronales recurrentes (RNN), la teoría de la resonancia adaptativa (ART) y la red neuronal celular (CNN) representan ejemplos notables de estos avances[3].

En 2010, Naz llevó a cabo un análisis sobre los métodos de segmentación de imágenes que empleaban la probabilidad espacial y los valores de C difusos (FCM) para el proceso de imágenes, junto con otras metodologías computacionales inteligentes [4].

2.1 Teoría de Resonancia adaptiva (ART)

Durante la década anterior, los marcos arquitectónicos de las redes neuronales empleadas para el procesamiento de imágenes han sufrido transformaciones significativas. El perceptrón multicapa (MLP), las redes neuronales oscilatorias (ONN), las redes neuronales acopladas a pulsos (PCNN), las redes neuronales recurrentes (RNN), las redes neuronales basadas en modelos probabilísticos (RPNN), las redes neuronales recurrentes (RNN), la teoría de la resonancia adaptativa (ART) y la red neuronal celular (CNN) representan ejemplos notables de estos avances [2][5].

2.2 Red neuronal CNN

El marco teórico de los autómatas celulares facilita la interacción de las unidades vecinas dentro de la red. Para comprender sus características operativas, comprende una cantidad específica de unidades denominadas celdas; estas representan sistemas dinámicos no lineales que encapsulan la información de entrada [6]. Una matriz de entradas de celdas adyacentes está interconectada localmente a cada celda. La tarea puede manifestarse como continua o discreta (DT-CNN). Los principales temas abordados en la literatura revisada sobre la CNN abarcan la detección de bordes, la segmentación de formas y, en ocasiones, la detección de movimiento. En la referencia [7], Kawahara emplea una CNN equipada con una plantilla dinámica (DCNN). Esta CNN identifica el movimiento y actualiza de forma iterativa parámetros de aprendizaje específicos. Strzelecki introduce una metodología de segmentación de texturas basada en una red de oscilaciones sincronizadas con CNN (SON) en [8]. Se observó que este método mostró un rendimiento mejorado en comparación con los perceptrones multicapa (MLP) convencionales. En [9], Babatunde modifica la arquitectura de la CNN para aumentar la detección de bordes utilizando técnicas complementarias como el detector de bordes Canny. En 2009, Kang propuso un algoritmo para la segmentación de huellas dactilares que emplea lógica difusa para determinar un umbral. Se utiliza un Threshold CNN (TCNN) para la organización de los datos de píxeles [10]. Corinto delinea un cambio de la CNN basada en aproximaciones polinomiales (POCNN), que examina su comportamiento dinámico a través de la segmentación regional [11]. En 2006 se formuló un diseño difuso de CNN (FCNN) para facilitar la segmentación de formas y bordes [12]. Una propuesta interesante es la DTCNN (CNN en tiempo discreto), que se identificó en investigaciones centradas en la segmentación de bordes [13]. Otra característica interesante es que las CNN son muy fáciles de implementar en hardware, junto con sus diversos modelos. Es habitual implementar algoritmos de CNN en circuitos integrados o unidades de procesamiento gráfico (GPU) [13] [14]. Además, la CNN ha demostrado una capacidad superior para discernir contornos con un ruido mínimo; numerosos estudios han yuxtapuesto los resultados de las técnicas tradicionales de procesamiento de imágenes con los de la CNN.

3. Metodología

Un dominio denominado procesamiento digital de imágenes abarca metodologías para el análisis digital.

3.1 Taxonomía del procesamiento de imágenes

Estos instrumentos se clasifican sistemáticamente en función del grado de procesamiento que se pretende ejecutar para analizar los datos contenidos en una imagen digital. La figura 1 ilustra una cadena de procesamiento que comprende estos distintos niveles. Una descripción sucinta de cada nivel puede hacerse en 4 etapas:

1) Preparación preliminar. Actividades destinadas a mejorar el análisis posterior y modificar la información en una imagen.

2) División. Procedimientos empleados para segmentar la imagen en secciones que encapsulan la información para abordar el problema en cuestión.

3) Clasificación y detección de objetos. La categorización e identificación sistemática de los objetos presentes en la imagen.

4) Examen de la imagen. La extracción de datos de nivel primario relativa a la representación de la imagen.

Estos instrumentos se clasifican sistemáticamente en función del grado de procesamiento que se pretende ejecutar para analizar los datos contenidos en una imagen digital. La figura 1 ilustra una cadena de procesamiento que comprende estos distintos niveles. Una descripción de cada nivel debería considerar:

- Segmentación de la forma. Detección de bordes
- Segmentación por color.
- Segmentación de textura.
- Segmentación de los movimientos

3.1 Característica en visión por computadora

Una pieza de datos en su imagen que es única para ese objeto en particular es una característica. Puede ser una forma particular o un color, como un borde, una línea o un segmento de imagen. Para distinguir entre sí los objetos, se emplea una buena característica. Por ejemplo, si se ofrece una característica como una rueda y se pregunta si ese objeto es un perro o una motocicleta, La rueda, en este caso, es un rasgo fuerte que distingue entre perros y motocicletas; sin embargo, si se le da la misma característica (una rueda) y se le pide que adivine si un objeto es una bicicleta o una motocicleta, esta característica no es lo suficientemente fuerte como para distinguir entre esos objetos. Es necesario buscar más características que describan un objeto de manera colectiva. Para que el algoritmo de aprendizaje sea capaz de aprender las características del objeto, se transforma los datos en bruto de una imagen en un vector de características.

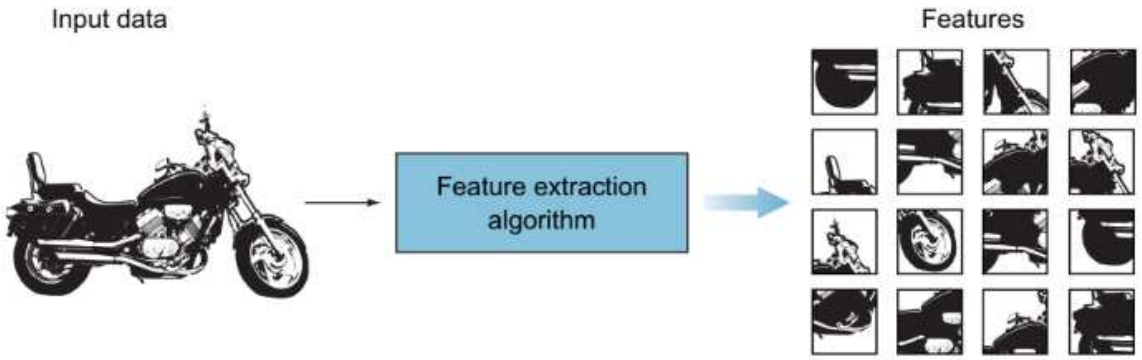


Fig. 1. Extracción de características de un objeto.

3.2 Característica en visión por computadora

Joseph Redmon et al. Creó una familia de redes de detección de objetos llamadas YOLO, que se han mejorado con el tiempo a través de las siguientes versiones: Yaylov1, Yaylov2, etc.

Uno de los primeros intentos de construir un detector de objetos rápido en tiempo real fue la familia YOLO, una serie de modelos DL de extremo a extremo diseñados para el reconocimiento rápido de objetos. Debido a su velocidad de detección, que con frecuencia se muestra en videos en tiempo real o en la entrada de alimentación de la cámara, los modelos se han popularizado para el

descubrimiento de objetos; sin embargo, la precisión de los modelos no es tan buena como la de los R-CNN.

El enfoque de los creadores de YOLO fue diferente al de las redes anteriores. YOLO se niega a seguir la propuesta de la región como R-CNN. Dividiendo la entrada en una cuadrícula de celdas, solo dicta sobre un número limitado de cuadros; cada celda anticipa directamente un cuadro delimitador y una clasificación de objetos. La figura 2 muestra cómo NMS consolida una predicción final con un gran número de cuadros delimitadores candidatos.

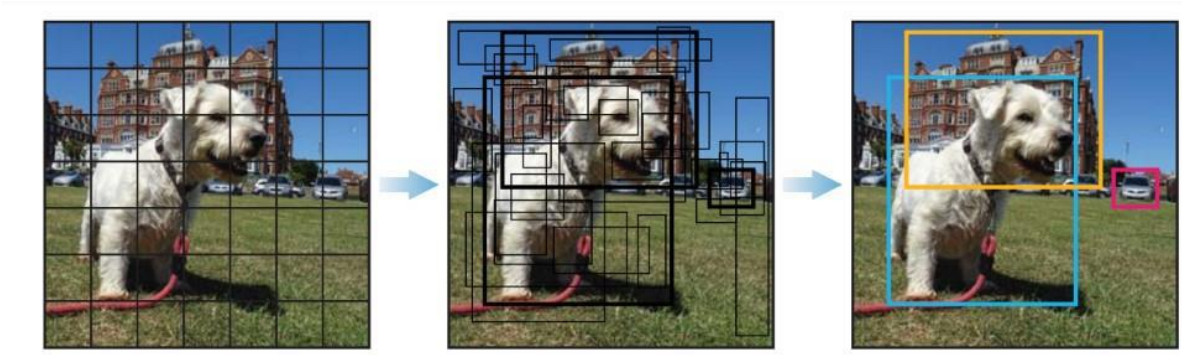
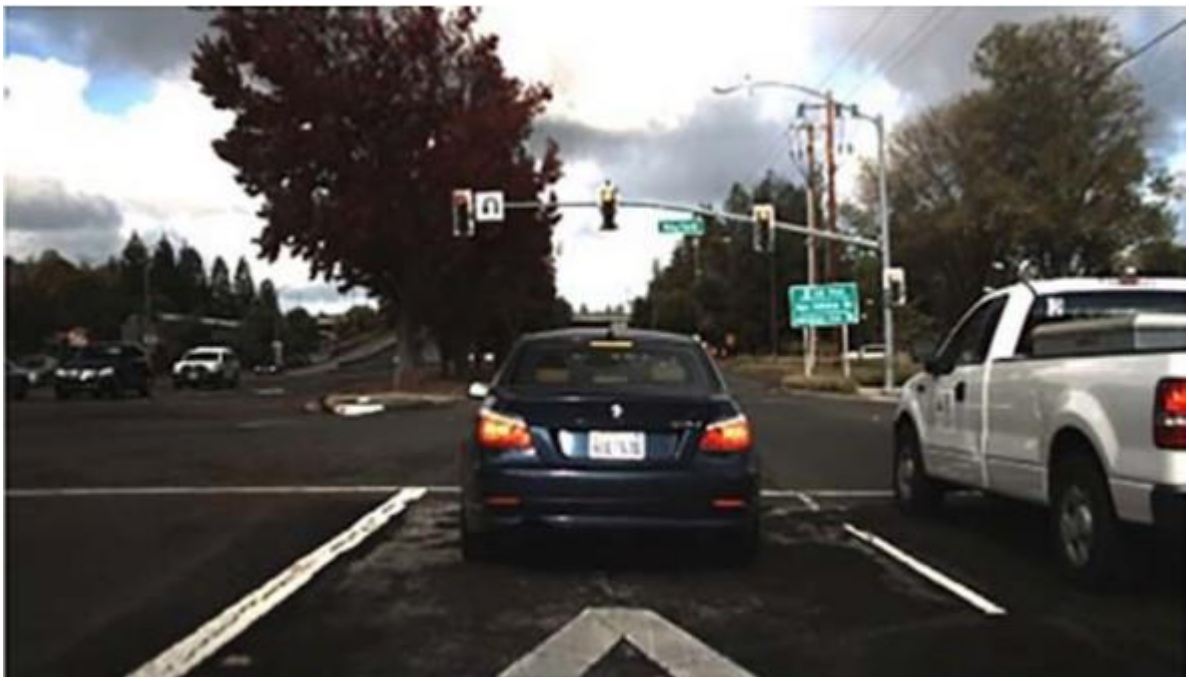


Fig. 2 Forma en que YOLO clasifica las imágenes.

1. Resultados

En este proyecto se utilizó un dataset que contiene 22,000 imágenes etiquetadas en cinco categorías: autos, camiones, bicicletas.

Lo que hace que este conjunto de datos sea muy interesante es que estas son imágenes en tiempo real tomadas mientras se conduce en una carretera, y las ciudades vecinas durante las condiciones de luz diurna. No se ha realizado ninguna limpieza de imagen. Observe la imagen de la figura 3.



2.
3.

4. **Fig. 3. Imágenes de entrenamiento.**

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 2, pp. 13 - 19.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

En la siguiente figura, se visualiza las predicciones que realiza el algoritmo, marcada con la variable car, la cual para la figura oscile entre 0.50 y 0.93. En este caso no importa el modelo o marca de automóvil, incluso tampoco el color. Todos los automóviles están en movimiento. Ver Figura 4.

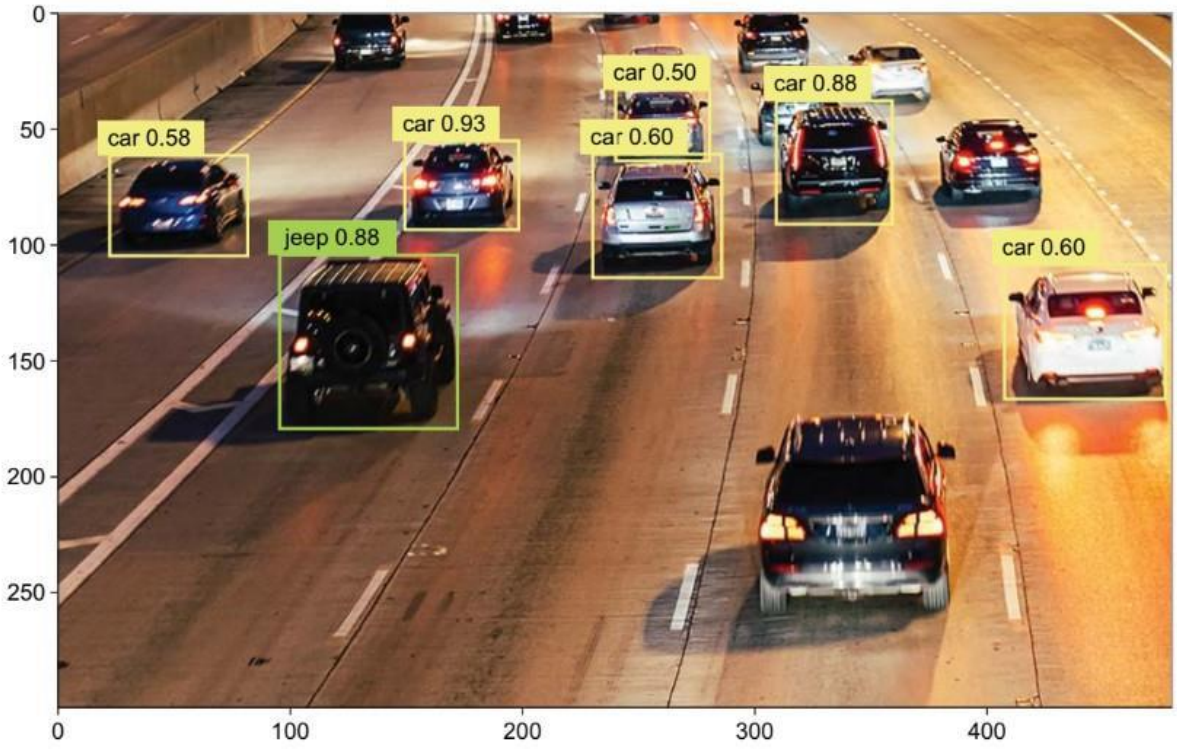


Fig. 4 Predicciones que se muestran en cuadros.

Para realizar las pruebas se emplearon videos, en donde se encuentran muchos objetos y se realizan las pruebas generando una predicción de 80%. Ver figura 5.

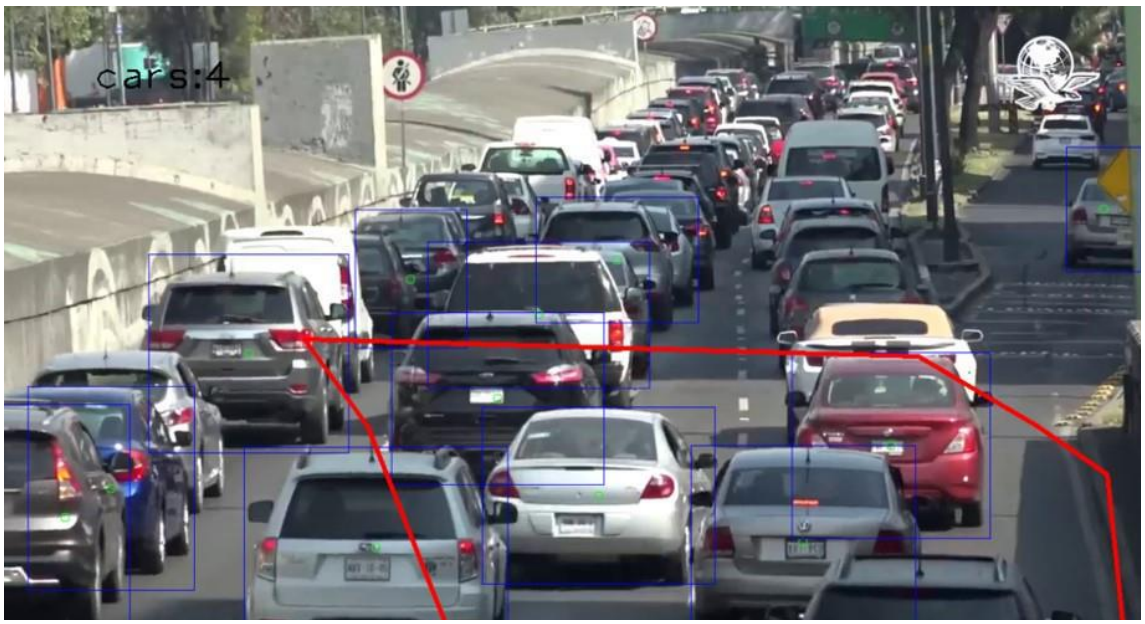


Fig. 5. Captura de pantalla en donde se muestra la selección de objetos.

Se puede definir un perímetro para la detección objetos. Y de esta manera todos los objetos que se encuentran dentro del área son contados.

Velocidad de captura de Imágenes: La velocidad de captura de imágenes, o frecuencia de cuadros, determina cuántas instantáneas o fotogramas se toman en un segundo. Podemos mencionar que en el sistema presentado se hacen 24 fotogramas por segundo. Sin embargo, Para capturar acciones rápidas y detalladas, como explosiones o gotas de agua, se pueden utilizar velocidades mucho más altas, que pueden llegar a cientos o incluso miles de fotogramas por segundo. Cuya alternativa requiere de equipo especializado.

Tiempo de procesamiento: Este dependerá del sistema de cómputo que se empleé. En nuestro caso al ser probado en diferentes sistemas de cómputo podemos afirmar que el proceso se realiza en tiempo real para una computadora Intel(R) Core(TM) i5 con CPU 760 a 2.80GHz, procesador x64.

Cuenta de objetos: Este depende de la resolución de la cámara, como se reportó la predicción fue de 80%. Por ejemplo en una imagen con 10 objetos, se reconocen por lo menos 8. Con las siguientes características: Resolución máxima: 1080p/30 fps - 720p/30 fps.

5. Conclusiones

La segmentación de imágenes utilizando YOLOv5 ha demostrado ser una herramienta eficaz y poderosa en el área de la visión por computadora. A través de su enfoque basado en redes neuronales convolucionales y la localización de objetos en tiempo real, YOLOv5 logra precisión y velocidad en la segmentación de imágenes. Esta capacidad de segmentación precisa y detección rápida ofrece una extensa progresión de aplicaciones prácticas, como la detección de objetos en videos de vigilancia, reconocimiento de objetos en vehículos autónomos y análisis de imágenes médicas.

Además, YOLOv5 presenta mejoras significativas en comparación con versiones anteriores, como un mejor rendimiento y eficiencia, lo que admite realizar la segmentación de imágenes en tiempo real incluso en hardware con recursos limitados. Esto lo convierte en una herramienta accesible para el desarrollo de aplicaciones y entornos computacionales.

En resumen, la segmentación de imágenes utilizando YOLOv5 es una técnica altamente efectiva y eficiente en la visión por computadora. Su habilidad para detectar y segmentar objetos en tiempo real con precisión y rapidez lo convierte en un instrumento valioso para diversas aplicaciones.

Como trabajo futuro, se plantea el desarrollo de un sistema avanzado de reconocimiento de objetos basado en el tipo de material. Este enfoque permitirá identificar automáticamente la composición de cada objeto, como plástico, metal, vidrio, entre otros. Además, se busca implementar un sistema electrónico de clasificación que facilite la separación automática de los objetos según su composición. Este sistema contribuiría significativamente a optimizar los procesos de reciclaje y gestión de residuos, mejorando la eficiencia en la separación de materiales y reduciendo el impacto ambiental, con miras a crear soluciones sostenibles y tecnológicamente avanzadas.

Referencias

[1] Weihua and Yuhong Li, “Applications of Artificial Neural Networks in Financial Economics: A Survey”, IEEE Computational Intelligence and Design (ISCID), vol. 1, Oct. 2010, pp. 211-214.
[2] Chowdhury, F.N, “A survey of neural networks applications in automatic control”, IEEE Proceedings of the 33rd Southeastern Symposium on System Theory, Athens OH, Mar 2001, pp. 349-353.
[3] Micheli and Tzanakou, “A Comparative Survey on Biometric Identity Authentication Techniques Based on Neural Networks”, IEEE Biometrics: Theory, Methods, and Applications book, Nov 2010, pp. 47-79.

[4] Naz Samina, Hammad Majed and Humanyun Irshad,“Image Segmentation using Fuzzy Clustering: A Survey”, International Conference on Emerging Technologies; islamabad, Oct 2010, pp. 181-186.
[5] S, Grossberg, “Competitive learning: from interative activation to adaptive theory”, Cognitive science, vol. 11, no. 1, pp. 23-63, Jan 1987.
[6] Grossberg S and Carpenter G, “Adaptive Resonance Theory”, Cambridge, Massachusetts : The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, no. 2, (1-12), 1998.
[7] Makasakazu Kawahara, Takashi Inoue and Yoshifumi Nishio, “Image Processing Application Using CNN with Dynamic Template”, International Workshop on Cellular Nanoscale; Berkeley CA, Feb 2010, pp. 1-6.
[8] Michal Strzelecki, Joonwhoan Lee and Sung-Hwan Jeong, “Analysis of Biomedical Textured Images with Application of Synchronized Oscillatorbased CNN”, IEEE 12th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications (CNNA), Berkeley CA, Feb 2010, pp. 1-6.
[9] Hezekiah Babatunde, Olusegun Folorunso and Adio Akinwale, “A Cellular Neural Network- Based Model for Edge Detection”, Journal of Information and Computing Science, vol. 5, no. 1, pp. 3-10, 2010.
[10] Jiaying Kang and Wenjuan Zhang, “Fingerprint Segmentation using Cellular Neural Network”, IEEE International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing, vol. 2, no. 1, Jun 2009, pp. 11-14.
[11] F Corinto, M Biey and M Gilli, “Non-linear coupled CNN models for multiscale image analysis”, International journal of circuit theory and applications, vol. 34, no. 1, pp. 77-88, Jan 2006.
[12] Koki Nishizono and Yoshifumi Nishio, “Image Processing of Gray Scale Images by Fuzzy Cellular Neural Network”, RISP International Workshop nonlinear circuits, Honolulu Hawaii, USA, Mar 3-5 2006, pp. 90-93.
[13] Fujita Tomohiro and Okamura Takashi, “CAM-Universal Machine: A DTCNN Implementation for Real-Time Image Processing”, 11th International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications, Santiago de Compostela, Spain, pp. 219-223, Jul 2008.
[14] Ryanne Dolan, Guilherme DeSouza, “GPU-Based Simulation of Cellular Neural Networks for Image Processing”, Proceedings of International Joint.
[15] Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, and Ali Farhadi, “You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection,” 2016, http://arxiv.org/abs/1506.02640.
[16] Joseph Redmon and Ali Farhadi, “YOLO9000: Better, Faster, Stronger,” 2016, http://arxiv.org/abs/1612.08242.
[17] Joseph Redmon and Ali Farhadi, “YOLOv3: An Incremental Improvement,” 2018, http://arxiv.org/abs/

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 3, pp. 20 - 32.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Diseño de un Robot Afectivo Mediante Herramienta CAD

Rodolfo Romero Herrera, Gabriela de Jesús López Ruiz y Laura Méndez Segundo

Escuela Superior de Computo. Instituto Politécnico Nacional.
rromeroh@ipn.mx

Resumen

El presente trabajo aborda el diseño de un robot afectivo para impresora 3D empleando una herramienta CAD (Diseño asistido por computadora); el cual será capaz de mimetizar algunas expresiones humanas haciendo uso de sensores. Este trabajo se enfoca en diseñar las partes para producir los movimientos de los ojos, boca, brazos y dedos. Una vez completado todos los mecanismos, el robot afectivo se imprime utilizando un sistema en 3D para completar el ensamblado. El objetivo es Diseñar el modelo de un robot afectivo el cual pueda imitar los movimientos de los ojos, boca, brazos y dedos de una persona para generar diferentes expresiones.

Palabras clave: Robot, afectivo, diseño, impresión 3D.

1. Introducción

SolidWorks constituye un software de diseño asistido por ordenador (CAD) diseñado específicamente para el modelado mecánico tridimensional, que actualmente está siendo desarrollado por SolidWorks Corporation. La aplicación facilita el modelado de componentes y ensamblajes individuales, al tiempo que permite extraer dibujos técnicos y otra información pertinente esencial para los procesos de fabricación. Abarca una amplia gama de materiales y funcionalidades, lo que hace que la ejecución de cualquier proyecto sea factible [1].

En el año 2003, tuvo lugar el desarrollo del robot WE-4R (Waseda Eyes No. 4 Refined), que permitía a la entidad transmitir emociones a través de sus expresiones faciales, torso y brazos [2] [3]. Posteriormente, en 2004, se creó el WE-4RII (Waseda Eyes No. 4 Refined II), que incorporaba la mano robótica antropomórfica RCH-1, que dotó al robot de capacidades para la expresión emocional, el agarre y la posible detección táctil. Las expresiones emocionales del WE-4RII se articulan a través de las cejas, los labios, la mandíbula, la coloración facial y las vocalizaciones. Las cejas están hechas de esponjas flexibles que poseen cuatro grados de libertad [4] [5] [6]. El robot del MIT [7] está diseñado para expresar emociones utilizando un total de 15 grados de libertad, lo que se atribuye a sus numerosas articulaciones servos accionados. Posee la capacidad de emular una amplia gama de expresiones faciales humanas. Esta innovación robótica se atribuye al Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) desde finales de la década de 1990 [7] [8].

Al diseñar robots con software de diseño asistido por ordenador (CAD), de la literatura se desprenden varias consideraciones clave. En primer lugar, la integración del modelado físico y virtual es crucial, ya que permite la resolución simultánea de problemas en ambos entornos, lo que mejora el proceso de diseño de varios sistemas robóticos, incluidos los robots bípedos y los manipuladores [9]. La capacidad de crear y verificar configuraciones con rapidez también es esencial; los marcos que facilitan la composición de las configuraciones y los comportamientos existentes permiten iteraciones rápidas y la identificación temprana de los problemas de diseño [10]. Además, el uso de herramientas de código abierto puede reducir los costos y aumentar la accesibilidad, especialmente en los entornos educativos, sin dejar de lograr un rendimiento satisfactorio [11]. Por último, emplear software que respalde el análisis y la simulación de estructuras robóticas complejas es vital para desarrollar mecanismos avanzados, como los robots humanoides [12]. En general, un enfoque multidisciplinario

que combine estos elementos puede mejorar significativamente la eficacia del diseño de robots mediante el uso del software CAD [9].

La integración de las experiencias afectivas en el diseño de robots mejora significativamente la interacción humano-robot (HRI) al fomentar la inteligencia emocional y mejorar la participación de los usuarios. Las investigaciones indican que los robots equipados con conciencia emocional pueden adaptar sus comportamientos en tiempo real, lo que conduce a colaboraciones más naturales y efectivas [13]. Los robots emocionalmente inteligentes pueden interpretar las emociones humanas y responder a ellas, mejorando el rendimiento de las tareas y la experiencia del usuario [13]

2. Desarrollo

El concepto de grados de libertad se refiere al recuento mínimo requerido de parámetros necesarios para determinar de manera exhaustiva la cinemática de un mecanismo o el número de reacciones de equilibrio dentro de un sistema estructural [2]. Si bien los grados de libertad asociados a determinadas articulaciones son fácilmente comprensibles, hay casos en los que pueden transformarse en sistemas equivalentes [2]. El diseño 3D se baso las etapas mostradas en la figura 1:

Modelado 3D:

1. **Software:** Utilizar programas como para crear modelos tridimensionales detallados.
2. **Geometría:** La geometría del modelo debe ser sólida, sin huecos internos.
3. **Topología:** Optimizar la topología del modelo para reducir el tiempo de impresión y mejorar la calidad de la superficie.

Preparación para la impresión:

1. **Slicing:** Utilizar software de slicing (como Cura, PrusaSlicer, Simplify3D) para convertir el modelo 3D en instrucciones de impresión para la impresora 3D.
2. **Configuración de la impresión:** Ajustar parámetros como la altura de capa, velocidad de impresión, relleno, soporte, etc.

Consideraciones de diseño:

Asegurarse de que las paredes del modelo sean lo suficientemente gruesas para proporcionar resistencia y evitar deformaciones y utilizar soportes para las partes sobresalientes del modelo que no estén conectadas a una base sólida. Se debe elegir la mejor orientación para imprimir el modelo, minimizando el uso de soportes y mejorando la calidad de la superficie. Por último, considerar las técnicas de post-procesamiento como el lijado, pintado o el uso de resinas para mejorar la apariencia y funcionalidad del modelo impreso.

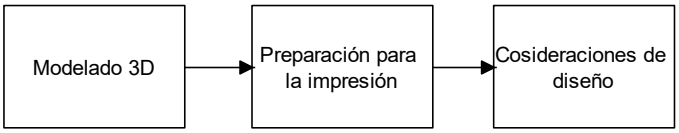


Figura 1. Secuencia de desarrollo.

En la Figura 2 se presenta un diagrama de bloques que ilustra de manera clara y ordenada las actividades organizadas en secuencia. Este diagrama permite visualizar de forma comprensible cada uno de los pasos del proceso, facilitando la identificación de las relaciones entre las distintas etapas y su flujo lógico. De esta manera, se proporciona una visión global del desarrollo de las actividades, destacando la interconexión y dependencias entre ellas.

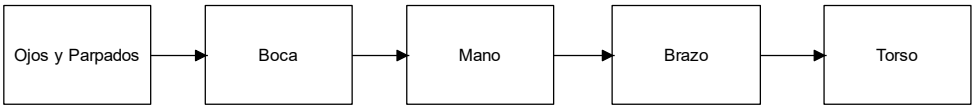


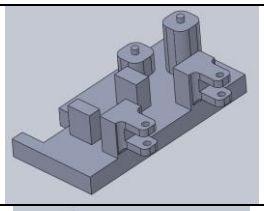
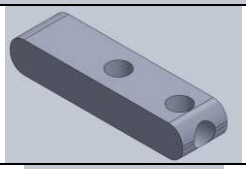
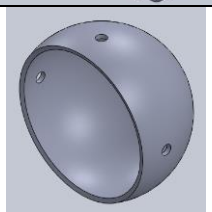
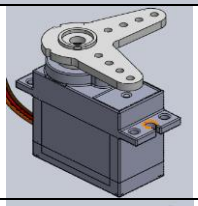
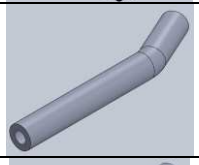
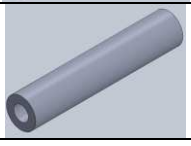
Figura 2. Diagrama a boques de las actividades.

2.1 Ojos y parpados

Los órganos oculares muestran un grado singular de libertad con respecto al eje de elevación, y poseen dos grados de libertad con respecto al eje de orientación; la velocidad angular máxima alcanzable es análoga a la de un ser humano, cuantificada específicamente como 600 °/s [3].

El mecanismo que conforma los ojos cuenta con 2 grados de libertad lo que permite imitar el movimiento ocular de un humano. Para lograr hacer funcionar este mecanismo se requieren 6 diferentes componentes ensamblados sobre una base. Nuevamente, para este mecanismo se utilizan 2 servomotes HXT900. En la tabla 1 se puede observar los componentes que conforman el diseño de ojos y parpados.

Tabla 1. Componentes para mecanismo de los ojos:

Veces que se requiere	Componente	Imagen
1	Base principal	
2	Cople interior ojo	
2	Ojo	
2	Servomotor HXT900	
2	Perno lateral ojo	
2	Perno superior ojo	

Ensamblando todos los componentes, el mecanismo final queda como semuestra en la figura 3.

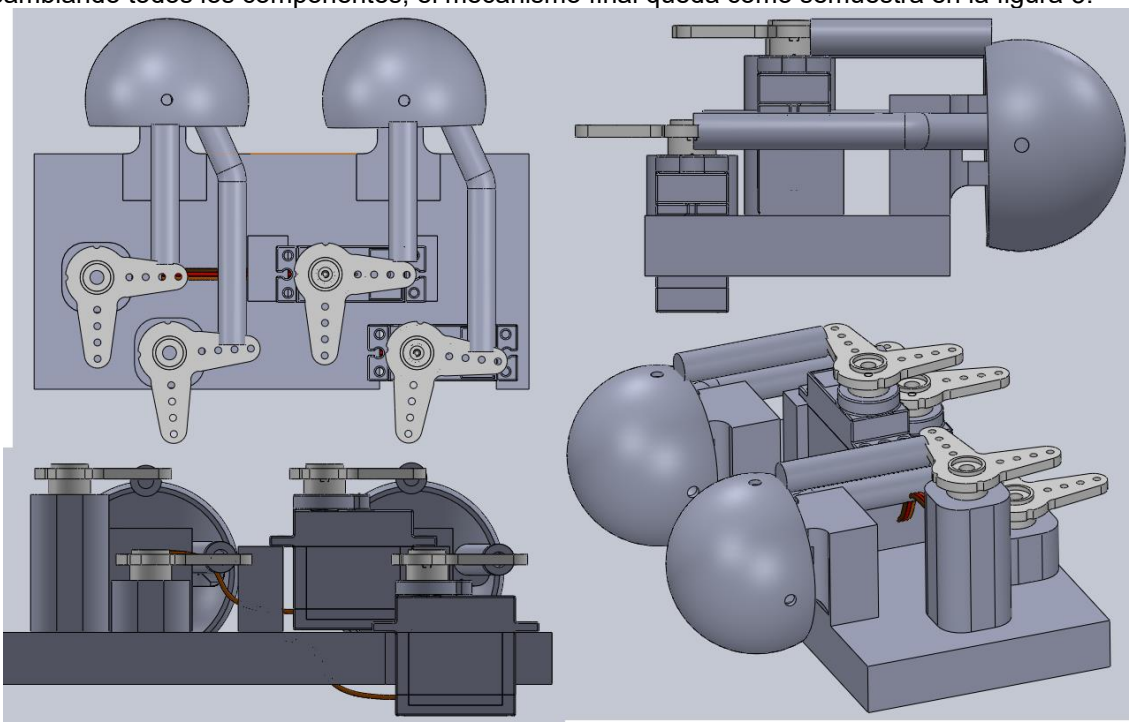


Figura 3. Ensamble de los ojos (Superior, lateral, posterior, isométrico)

2.2 Boca

La cavidad oral humana está rodeada por los labios superiores e inferiores, que cumplen funciones críticas en una multitud de esfuerzos, incluida la comunicación lingüística y las señales no verbales, ejemplificadas por el acto de sonreír [3].

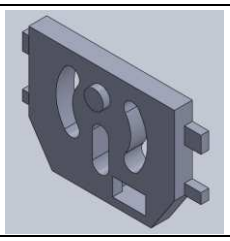
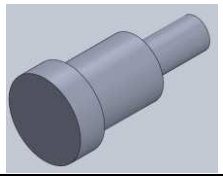
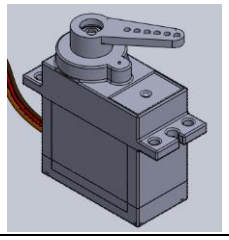
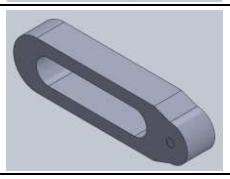
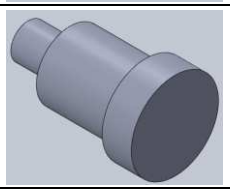
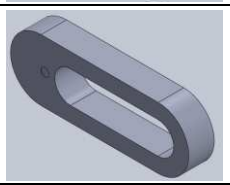
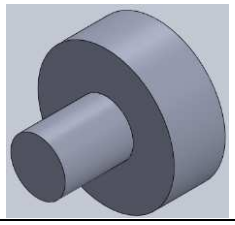
La regulación de la apertura de la cavidad bucal es esencial para retener las sustancias y los líquidos alimentarios dentro de los confines de la boca. Las dimensiones y la morfología de la boca desempeñan un papel fundamental en la comunicación verbal, ya que facilitan una amplia gama de vocalizaciones y sonidos fonéticos sostenidos [4].

La boca es un órgano muy empleado por los seres humanos para comunicar gran número de expresiones, por medio de este órgano es posible demostrar felicidad, tristeza, miedo, entre otras expresiones [5].

Para el desarrollo de la boca, se propone un mecanismo de 4 articulaciones en el cual se mantenga fijo el punto superior central. De esta forma por medio de los movimientos controlados de las 3 articulaciones restantes será posible realizar diferentes expresiones como son: felicidad, tristeza, sorpresa, enojo, aburrimiento, entre otras.

El mecanismo de la boca se compone de un conjunto de siete componentes distintos que se fijan a una estructura primaria, logrando así un máximo de tres grados de libertad, que medirá aproximadamente 106 mm x 85 mm x 35 mm. Para minimizar las dimensiones del mecanismo, se propone implementar los servomotores HEXTRONIK HXT900. Los componentes individuales se ilustran en la Tabla 2.

Tabla 2. Componentes para mecanismo de la Boca.

Veces que se requiere	Componente	Imagen
1	Sección principal	
2	Perno lateral	
3	Servomotor HXT900	
2	Riel lateral	
1	Perno inferior	
1	Riel inferior	
3	Tope para perno	

Ensamblando todos los componentes, el mecanismo final queda como se observa en la figura 4.

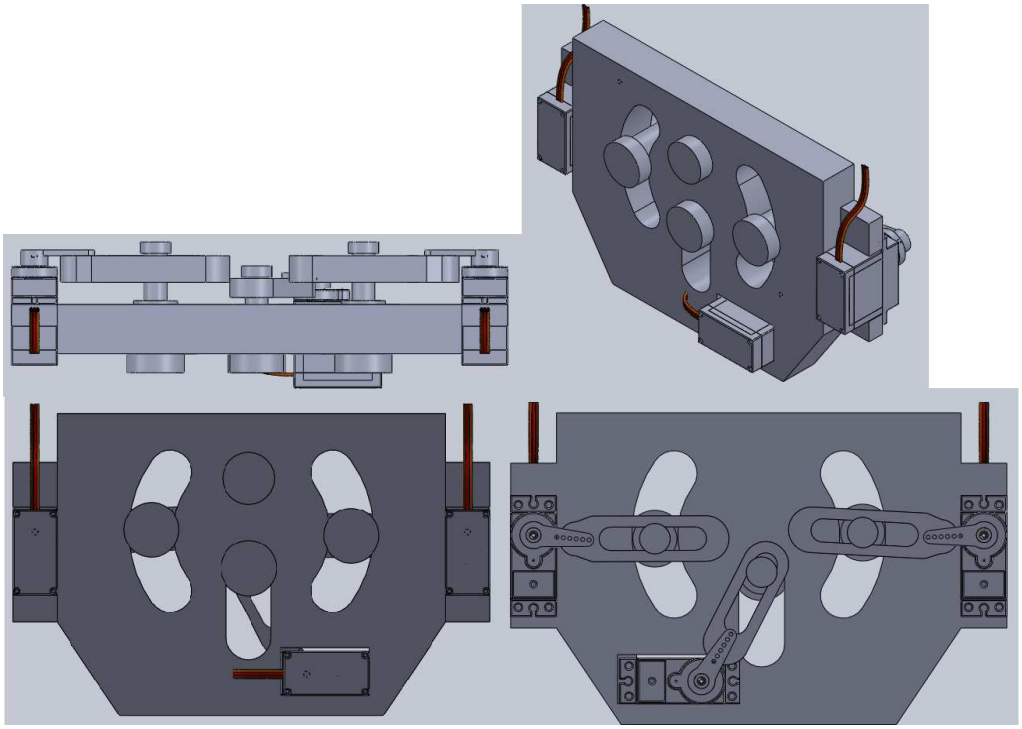


Figura 4. Ensamble de la boca (superior, isométrico, frontal, posterior)

2.3 Mano

La mano humana es el instrumento principal para la manipulación de objetos, aunque de estas aplicaciones fundamentales surgen una multitud de funcionalidades adicionales, atribuibles a la notable versatilidad de movimiento que la mano es capaz de ejecutar, así como al alto grado de precisión que puede alcanzar en dichos movimientos. Entre las ilustraciones de las diversas aplicaciones de las manos se incluyen:

- Las manos y los dedos son "utensilios" primordiales para poder comer y beber.
- Las manos se utilizan en múltiples costumbres, como el saludo
- Por medio de las manos es posible expresar algunas emociones [5], esto dependiendo de los movimientos y velocidad con que se realizan, además existen algunos patrones que se pueden interpretar como falta de confianza, alegría, seguridad, nerviosismo, etc.

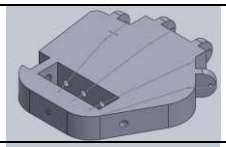
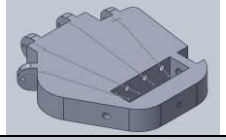
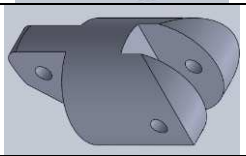
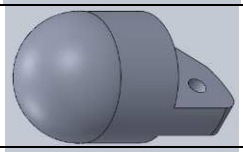
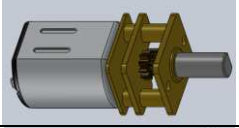
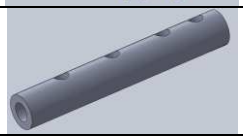
La mano humana es uno de los mecanismos más complejos al momento de mimetizar, es tan sensible y movible que actualmente no se han podido desarrollar sistemas capaces de imitar en su totalidad sus capacidades.

La mano humana consta de 20 grados de libertad, y más de 10,000 sensores distribuidos en los 5 dedos. Sin embargo, para fines prácticos en este proyecto, se propone una mano de solo 3 dedos y un pulgar, esto para reducir costos y complejidad del mecanismo. Además, solo se podrán extender y comprimir todos los dedos al mismo tiempo.

La mano propuesta tendrá 7 grados de libertad, con esto es suficiente para generar expresiones como temor, alegría, enojo. Para generar el movimiento de los dedos se utiliza en el diseño un motor Pololu Micro Metal Gearmotor HP 100:1 en cada mano. La tabla 3 muestra los componentes principales.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 3, pp. 20 - 32.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Tabla 3. Componentes para mecanismo de ambas Manos:

Veces que se requiere	Componente	Imagen
1	Palma izquierda	
1	Palma derecha	
6	Articulación interfalángica proximal	
8	Articulación interfalángica distal	
8	Dedo	
2	Motor HP 100:1	
2	Perno	

Ensamblando todos los componentes, el mecanismo final se muestra en la figura 5.

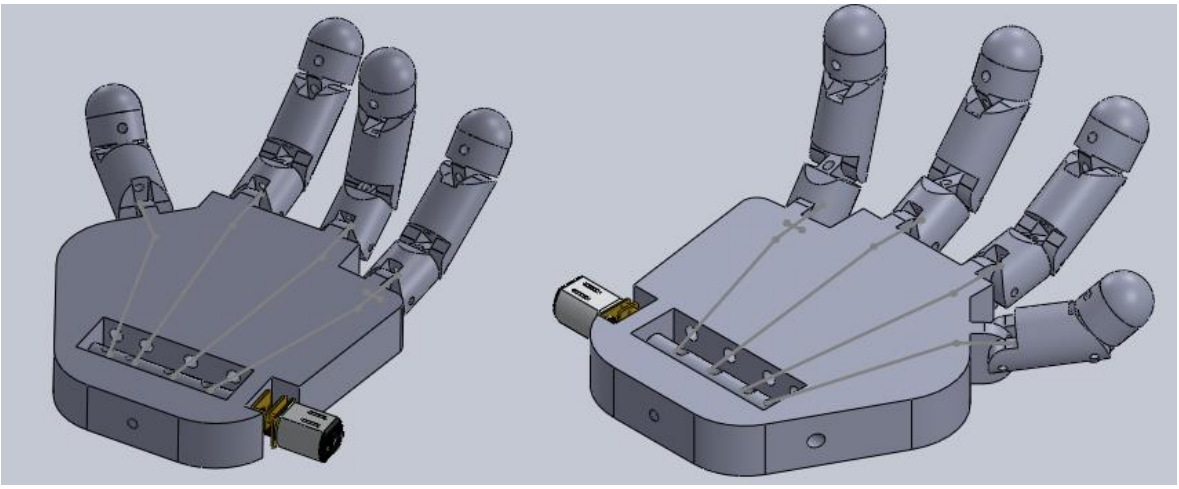


Figura 5. Ensamble de manos

Como se observa el motor Pololu Micro Metal Gearmotor HP 100:1 es un motor de DC. A diferencia de los servomotores que se usan en los ensambles anteriores, en este tipo de motores no es posible controlar la velocidad de giro, ángulo y sentido. Para poder lograr esto, adicionalmente se requiere un circuito conocido como puente H. El puente H es un arreglo de transistores que permiten invertir el giro del motor activando ciertas configuraciones. La figura 6 muestra el diagrama eléctrico.

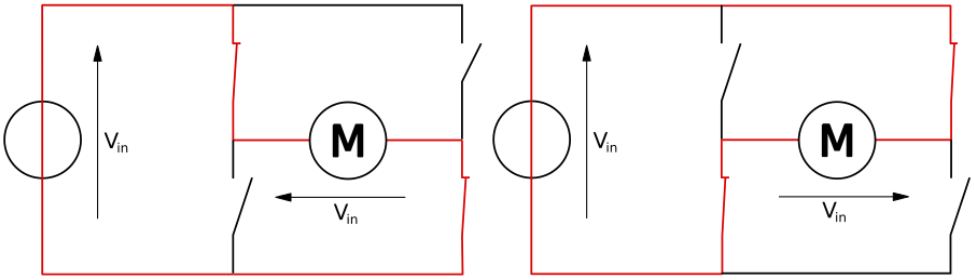


Figura 6. Diagrama de funcionamiento de un puente H

Se propone usar un Módulo L298n Driver Doble Dual Puente H, que es el más comercial por venir en una placa tipo PCV el cual se puede conectar y controlar directamente desde una tarjera ARDUINO UNO. Ver figura 7.

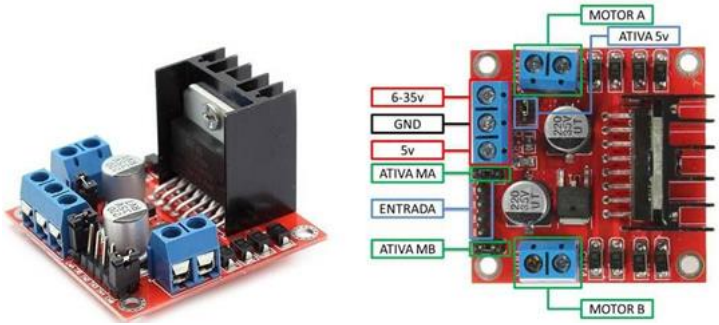


Figura 7. Puente H L298n Driver Doble Dual

2.4 Brazo

El brazo es el componente más largo de todo el robot y también es el que requiere especial cuidado con la selección de servomotores.
Hay unos cálculos previos que se requieren:

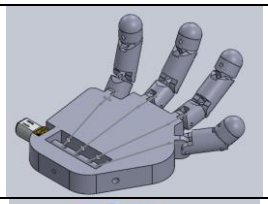
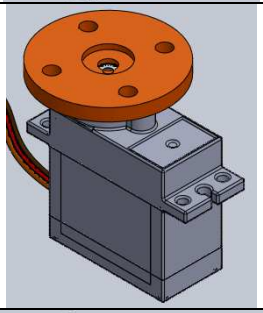
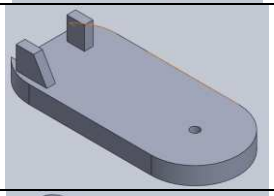
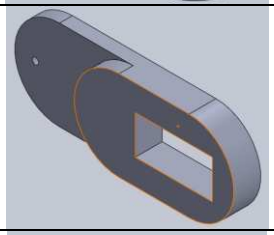
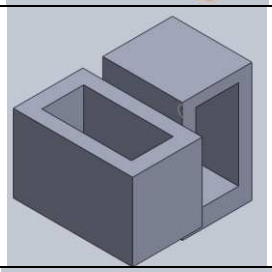
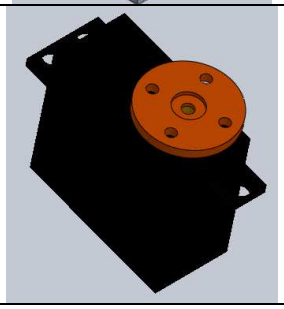
El volumen de la mano completa utilizando PLA que es el material más denso entre todas las opciones para impresión en 3D es de 120 [g].
Adicionando la estructura del antebrazo, se obtiene una masa total de 272.42 [g]. Conociendo que 1 [g] equivale a 0.0098 [N], entonces 272.42 [g]= 2.671 [N].

El brazo completamente extendido tiene una longitud de 34 [cm] = 0.34 [m]. Por lo que se genera un momento de M=0.34 [m] (2.671 [N])= 0.90814 [Nm]. Nuevamente, conociendo que 1 [Nm] equivale a 11,801 [Oz.In], entonces 0.90814 [Nm]= 10.72 [Oz.In].

Con esta información, es posible seleccionar un servomotor que se ajuste a estas especificaciones, por lo que se decidió por el servomotor HSR-5990TG el cual tiene un torque de 33.29 [Oz.In]. Aunque su torque está muy por encima del calculado, es el más aproximado y económico.

El ensamble completo de cada brazo consta de 7 piezas diferentes, entre ellas se requieren 2 servomotores HSR-5990TG y uno más HXT900, además se requiere la mano completamente ensamblada. En la tabla 4 se muestra los componentes del brazo.

Tabla 4. Componentes para el mecanismo de ambos brazos:

Veces que se requiere	Componente	Imagen
1	Mano completa izquierda/ derecha	
2	Servomotor HXT900	
2	Antebrazo	
2	Brazo	
2	Soporte	
6	Servomotor HSR5990TG	

En las figura 8 y 9 se muestran viatas de los brazo ensamblados.

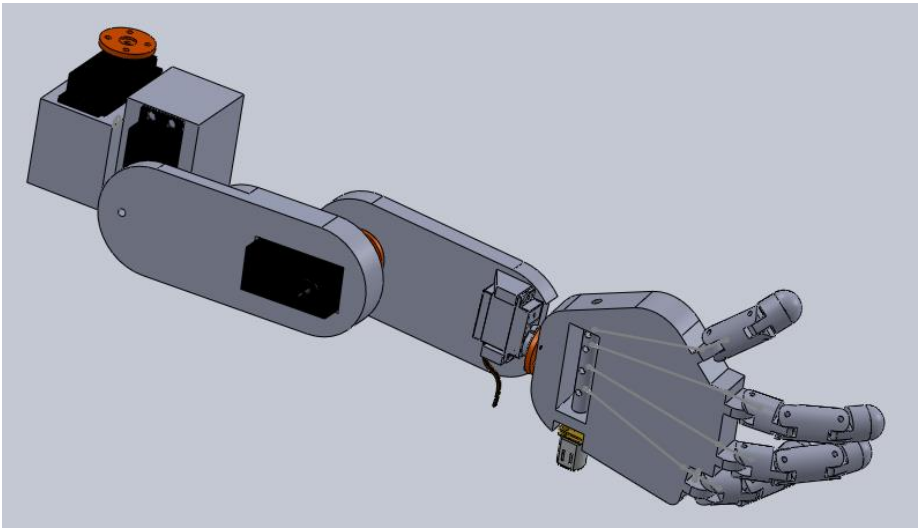


Figura 8. Ensamble brazo derecho

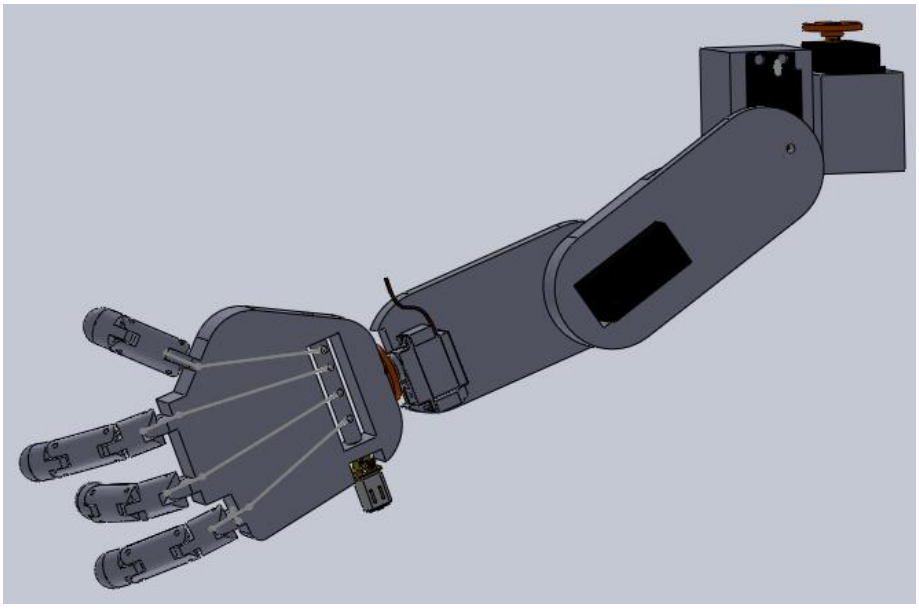


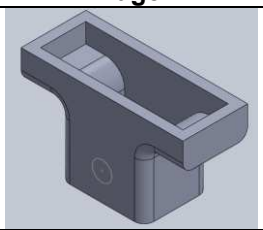
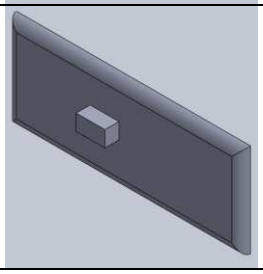
Figura 9. Ensamble brazo izquierdo

2.4 Torso

El torso es la estructura más simple de todo el ensamble; sin embargo, no por eso es menos importante, ya que esta se encarga de sostener y mantener todas las demás piezas, es por ello que se sugiere que esta pieza sea elaborada de otro material como acrílico de más de 1cm de grosor, o aluminio o que se pueda tornear en Nylamid.

El torso propuesto se compone de 2 piezas, y es hueco por dentro para reducir peso y material. Sus componentes se muestran en la tabla 5.

Tabla de componentes para torso.

Veces que se requiere	Componente	Imagen
1	Torso	
1	Tapa de torso	

1. Resultado Final

Una vez completado el ensamblaje de cada mecanismo por separado, hay que unir todos para completar el diseño. La figuras 10 y 11 muestran vistas del diseñó CAD para robot afectivo.

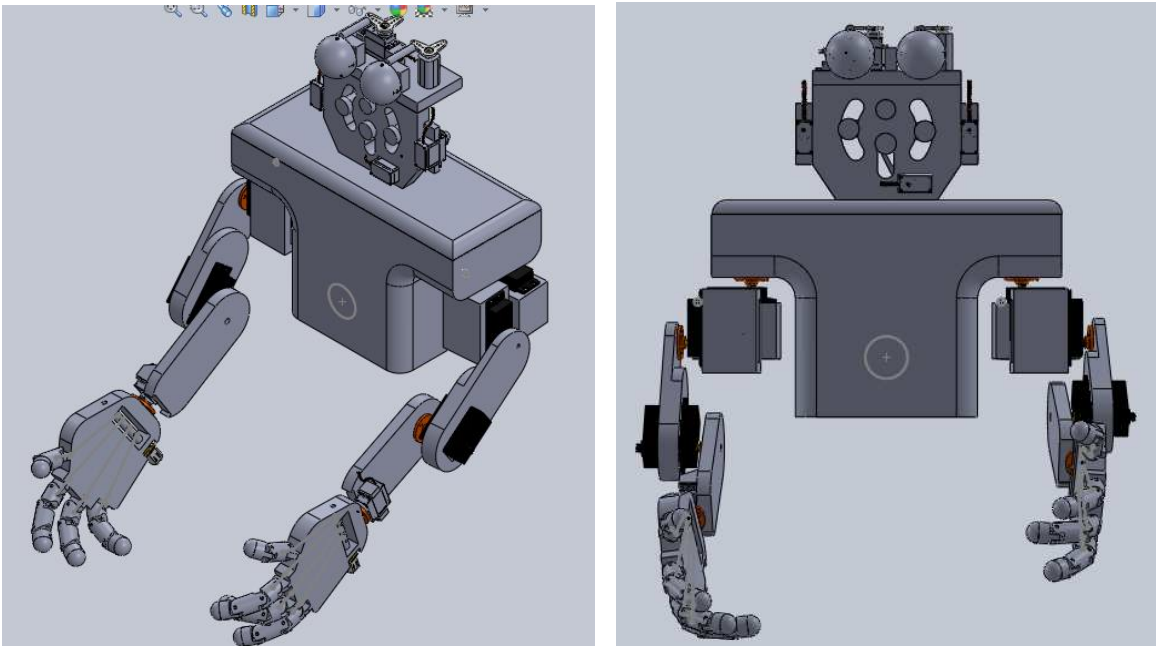


Figura 10 Vistas isometrico y frontal

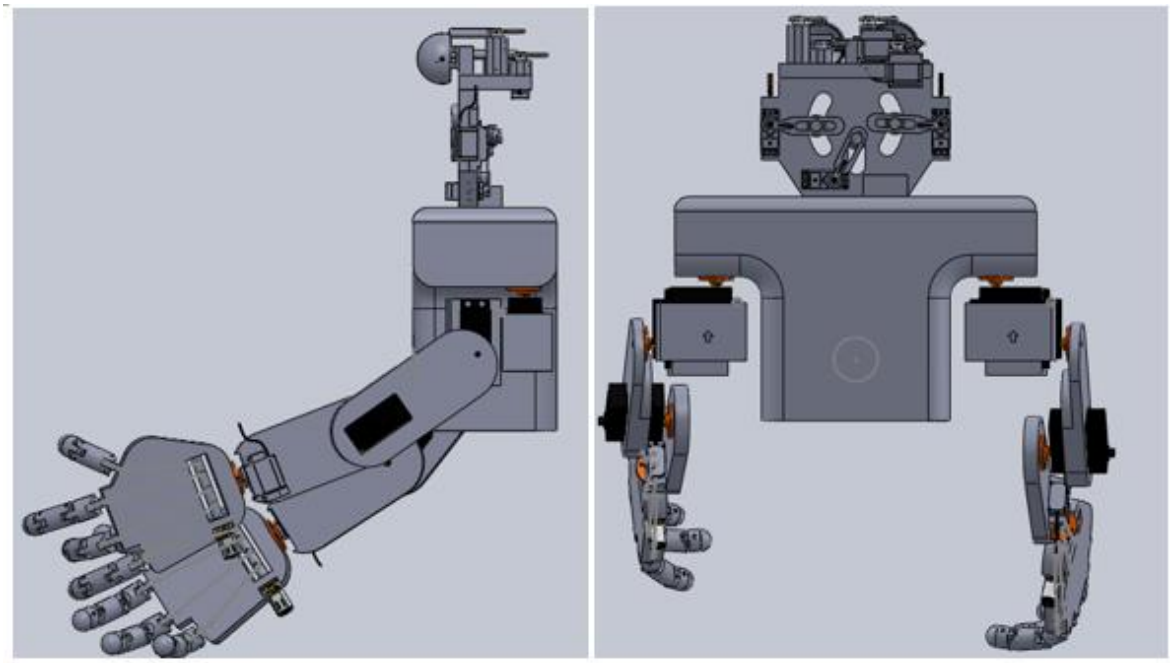


Figura 11. Ensamble completo para un robot afectivo

2. Conclusiones

El diseño de un robot afectivo requiere de varios mecanismos para mimetizar diferentes expresiones humanas, sin embargo, tratar de imitar este tipo de mecanismos resulta una tarea compleja ya que para lograr la completa mimetización es necesario varios actuadores y motores funcionando conjuntamente en un espacio reducido.

En este diseño los mecanismos requirieron de imaginación y búsqueda en diferentes referencias para comprender, y simplificar los movimientos, permitiendo obtener diferentes expresiones con un número pequeño de servomotores/ motores como es el caso de las manos y la boca.

Si bien la integración de las experiencias afectivas es prometedora, siguen existiendo desafíos para garantizar que el reconocimiento afectivo sea relevante y adaptable desde el punto de vista del contexto, lo que pone de relieve la necesidad de continuar investigando en esta área y generar diseños que permitan dar mayor realismo a estas máquinas; lo que permite generar sus expresiones afectivas más próximas a las de un ser humano.

Actualmente se ha diseño el software de reconocimiento de cinco expresiones faciales y el diseño de un robot que las reproduce mediante una pantalla. Con el diseño del presente proyecto se pretende sustituir dicha proyección.

Es importante desarrollar este tipo de robots ya que la impresión 3D está transformando la forma en que diseñamos y fabricamos robots humanoides. Esta tecnología ofrece una gran cantidad de beneficios, desde la personalización hasta la reducción de costos, y tiene el potencial de revolucionar muchos sectores.

Referencias

[1] www.solidworks.es/
[2] Subir Kumar saha, introducción a la robótica, Mc Graw Hill, 2010
[3] Le Vay David, ANATOMÍA Y FISIOLOGÍA HUMANA, editorial Paidotribo, 2004
[4] Velayos José Luis, Anatomía de la Cabeza, Ed. Médica Panamericana, 2010.
[5] R. Carlson, Neil, Fundamentos de psicología fisiológica, editorial Casa del Libro, 2000

[6] Zecca, M.; Chaminade, T.; Umilta, M.A.; Itoh, K.; Saito, M.; Endo, N. Emotional Expression Humanoid Robot WE-4RII- Evaluation of the perception of facial emotional expressions by using fMRI.
[7] Breazeal, C.,"Robot in Society: Friend or Appliance?". In *Agents99 workshop on emotion-based agent architectures*, Seattle, WA. 18-26.
[8] www.ai.mit.edu/projects/humanoidroboticsgroup/kismet/kismet.html
[9] M., V, Chugunov., I., N., Polunina, Interdisciplinary modelling of robots using CAD/CAE technology. Mordovia University Bulletin, 28(2):181-190. doi: 10.15507/0236-2910.028.201802.181-190, 2018.
[10] Tarik, Tosun., Gangyuan, Jing., Hadas, Kress-Gazit., Mark, Yim. Computer-Aided Compositional Design and Verification for Modular Robots. doi: 10.1007/978-3-319-51532-8_15, 2017
[11] Antor Mahamudul, Hashan., Abdullah, Haidari., Srishti, Saha., Titas, Paul. (4) Computer Numerically Controlled Drawing Robot Based on Computer-Aided Design. doi: 10.32996/JMCIE.2021.2.1.2, 2020
[12] Rachid, Manseur, Software-aided design of robotic mechanisms. doi: 10.1109/ICAR.2013.6766579, 2013.
[13] K, Anitha., J., Hannah, Monisha., Indrajit, Ghosal. (2024). (1) Enhancing Human-Robot Collaboration Through Emotional Intelligence. Advances in computational intelligence and robotics book series, doi: 10.4018/979-8-3693-2794-4.ch007

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 4, pp. 33 - 46.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Propuesta de Desarrollo Técnico de un Serious Game Enfocado en la Nutrición Infantil

Ramirez Torres Julio Cesar[1], Santoyo Mora Mauro[1], Martínez Nolasco Juan José[1], Sandoval Salazar Cuauhtémoc[2] y Torres Montoya Jazmín[2].

Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica Tecnológico Nacional de México/ IT Celaya, 38010, Celaya, Guanajuato, México[1].

División de Ciencias de la Salud e Ingenierías. Campus Celaya – Salvatierra, Universidad de Guanajuato, 38060, Celaya, Guanajuato, México[2].

m2303044@itcelaya.edu.mx

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo dar a conocer el procedimiento para la creación de un Serious Game o videojuego serio; el cual, se ha diseñado con la intención de ofrecer un aprendizaje en áreas como la educación, la salud o la capacitación en el trabajo. El diseño que se aborda aquí toma como foco de interés la nutrición infantil. En principio, se exponen las características y fundamentos que hacen que el videojuego pueda ser empleado como un programa de intervención alternativo que permita una prevención efectiva en los problemas de la obesidad y sobrepeso desde edades tempranas. Un Serious Game, sigue presentando el formato de un videojuego convencional y este es en esencia un software; por tal motivo, se abordará la preproducción, producción y postproducción, siendo estas las etapas esenciales para la creación de un videojuego, analizando y comparando las diferencias y similitudes entre este y un Serious Game. Es necesario la implementación de pruebas piloto y experimentales, donde se trabaja con el público objetivo con la finalidad de obtener valores de satisfacción del usuario y un seguimiento sobre los hábitos alimentarios para observar si existe una mejora antes y después de la intervención. Por último, se mostrará a modo de ejemplo el diseño y desarrollo de un Serious Game sobre nutrición en etapa de prototipo.

Palabras clave: Serious Game, Game Desing Document, motor del juego, plato del buen comer, hábitos alimentarios.

Abstract

The aim of this work is to present the process of creating a Serious Game, which is designed with the purpose of offering new knowledge in areas such as education, health or workplace training. The design discussed here focuses on children's nutrition. First, the characteristics and fundamentals that justify the use of a videogame as an alternative intervention program for the prevention of childhood obesity are presented. A Serious Game is still a video game. Therefore, the pre-production, production and post-production phases will be addressed as they are essential to the development of a video game. However, these phases are analyzed and adapted to develop a Serious Game. In order to achieve real effectiveness in the use of a Serious Game, it is necessary to perform both pilot and experimental tests. With these tests, it will be possible to determine user satisfaction as well as the impact of the game by monitoring and analyzing food habits before and after the intervention. Finally, an example of a Serious Game on nutrition that is currently being designed and developed will be presented.

Keywords: Serious Game, Game Desing Document, Game engine, Eatwell Plate, Food habits.

1. Introducción

Actualmente la sociedad percibe a los videojuegos como una forma de ocio y que sólo representa una pérdida de tiempo, el cual podría emplearse para desarrollar actividades más productivas. Sin embargo, algunos estudios han encontrado que un videojuego provee de habilidades al usuario como el aumento de la coordinación ojo-mano, el incremento de las habilidades cognitivas [1], además del desarrollo de la creatividad, la competencia intelectual, fortaleza emocional y estabilidad personal [2]. Todas estas habilidades son producto de una respuesta inmediata a las acciones y elecciones del jugador; la cual, se da a través de los sentidos de la vista, el tacto y la audición, reforzando así el aprendizaje por ensayo y error en el jugador de una manera efectiva [3]. De esta forma, los videojuegos se pueden perfilar como herramientas para ser empleadas en áreas que busquen un propósito de aprendizaje a través de un formato lúdico.

El término *Serious Game* (SG), o Juego Serio, fue empleado por primera vez por Clark Abt en 1970, quien lo define como “Juegos que tienen un propósito educativo explícito y cuidadosamente planeado y no pensado para ser jugado únicamente por diversión”. Claro está que en esa época Clark se refería a juegos tradicionales, hoy en día un SG hace referencia a un videojuego diseñado para persuadir a los jugadores a modificar sus actitudes o comportamientos relacionados con la salud a través del entretenimiento virtualizado [4].

Los SG pueden ser aplicados en áreas de la educación, la salud y en la capacitación de diferentes trabajos. En la salud se han reportado SG diseñados para la prevención del consumo de sustancias psicoactivas, prevención y tratamiento de enfermedades psiquiátricas, tratamiento de ansiedad en niños con autismo, educación a niños sobre primeros auxilios, manejo de la diabetes tanto en niños como en adultos, entre otros [5].

Por mencionar algunos ejemplos de uso de SG, se ha demostrado el uso de estos para la prevención del tabaquismo. Aquí, los autores observaron que los elementos de juego más empleados son recompensas y castigos con base en las decisiones del jugador, denotando así efectos positivos estadísticamente significativos en el abandono o disminución del consumo de tabaco [6]. En el caso de uso de SG como una alternativa en el tratamiento de la demencia, existe evidencia de mejoras en los tiempos de finalización y reacción; así como, las funciones ejecutivas, mejora en la concentración y eficiencia de la memoria [7]. Por su parte, en otra investigación se presenta un proyecto enfocado en crear un entorno virtual de aprendizaje divertido y atractivo basado en la resolución de puzles para aumentar la motivación y la concentración de niños con trastorno por déficit de atención e imperatividad (TDAH), el estudio confirma que la concentración de los niños mejora después de jugar el videojuego. [8]

La elaboración de un SG no es genérica, más bien se deben analizar cada caso en específico; es decir, no se puede presentar el mismo SG a un público con características distintas que las del público objetivo inicial. Por tal motivo, es necesario la participación de dos equipos en el desarrollo de un SG: el equipo técnico, el cual está compuesto por programadores, diseñadores gráficos y animadores digitales; así como, un equipo de investigadores y especialistas que provean de información relacionada con el usuario final. A partir de la aplicación deseada, este equipo de especialistas podría estar integrado por psicólogos, nutriólogos, pedagogos, médicos, entre otros. Cabe resaltar que la colaboración de ambos equipos busca dar un equilibrio entre la diversión y el aprendizaje, pues es indispensable que el jugador no se aburra mientras apropia el aprendizaje que se desea.

Un área importante en la que un SG podría tener un gran impacto dentro de nuestro país es en la prevención de la obesidad infantil, pues en México dos de cada 10 menores de 12 años tienen sobrepeso; mientras que, otros dos de cada 10 presentan obesidad. Para el caso de la adolescencia se muestran datos similares, pues tres de cada 10 cuentan con sobrepeso y dos de cada 10 con

obesidad [9]. Esta situación en México contiene estrechas relaciones con la nutrición de la población, dado que la dieta mexicana es rica en almidón (maíz y trigo), además de que existe una gran ingesta de alimentos ultra procesados y bebidas azucaras [10]. Así mismo, se ha observado que un niño con obesidad tiene 40% de probabilidad de llegar a ser un adolescente obeso y un 70% de ser un adulto con problemas de nutrición [11]. Además, la obesidad y el sobrepeso conllevan problemas adyacentes como diabetes, apnea del sueño, problemas ortopédicos, diferentes tipos de cáncer, hipertensión, enfermedades cardiovasculares y respiratorios [12]. A estos problemas de salud podrían sumarse incluso afectaciones al estado emocional tanto en niños como en adultos, afectaciones que se presentan en forma de depresión, ansiedad y baja autoestima; a estas sensaciones se podría incluso sumar el hostigamiento por parte de compañeros del colegio en la edad escolar, lo que provoca a su vez un bajo rendimiento escolar y afecta negativamente la motivación para aprender [13].

Bajo estas condiciones, es fundamental que algunos programas de prevención del sobrepeso y obesidad sean implementados desde una edad temprana; ya que, los hábitos adoptados en edades muy tempranas persisten durante la edad adulta. Por ello, la elaboración de un SG centrado en la educación sobre nutrición surge como una herramienta potencial, pues con base en la psicología conductual y cognitivo–conductual que acompaña este tipo de herramientas es posible modificar los patrones de conducta mediante programas de intervención [14]. Con ello, se espera poder lograr un cambio en los hábitos alimentarios de los usuarios desde la niñez y que estos perduren en la adultez.

El presente artículo expone una propuesta de desarrollo técnico de SG centrados en la enseñanza de la Nutrición para una población infantil. De inicio, en la sección dos se aborda el esquema general en el desarrollo técnico de un videojuego (preproducción, producción y publicación) [15] para ligarlo con la intención didáctica sobre la apropiación de buenos hábitos alimentarios, esto con acompañamiento técnico de especialistas en nutrición. Posteriormente, la sección tres documenta los inicios del desarrollo del SG una vez que se definió una metodología de desarrollo. Finalmente, en la sección de conclusiones se discuten las experiencias en el desarrollo de este SG, así como los beneficios esperados que alcanzará la población infantil en sus hábitos alimentarios.

2. Metodología en el desarrollo de un Serious Game

La finalidad de un SG en el área de la salud es fomentar el aprendizaje y buscar un cambio conductual favorecedor que beneficie la salud del usuario. Un problema que se afronta al diseñar este tipo de contenido es la dificultad de medir de forma confiable los resultados de aprendizaje a través de su uso [16], si se observa este beneficio para el usuario desde la perspectiva de la Nutrición, se espera que el SG le permita adoptar buenas prácticas en sus hábitos alimentarios y un aumento sobre sus conocimientos en alimentación saludable después de haberlo jugado durante un tiempo determinado. El desarrollo y comprobación de un SG nutricional se basa en las cuatro etapas mostradas en la Figura 1. Se puede denotar el trabajo conjunto de nutriólogos con desarrolladores en las cuatro etapas, donde en la primera etapa se abordan las herramientas para la creación del SG, así como los elementos que este debe incluir para lograr la enseñanza deseada. La segunda etapa permite la adquisición de errores (bugs) dentro del juego, para su posterior corrección; así como la opinión de los usuarios acerca del mismo. Las pruebas experimentales tienen como objetivo la recolección de datos relacionados con los hábitos alimentarios y conocimiento nutricional de los usuarios, para finalmente en la última etapa se analizan dichos datos y determinar si existe una diferencia significativa para concluir que el Serious Game tiene potencial para mejorar la adopción de hábitos alimentarios.

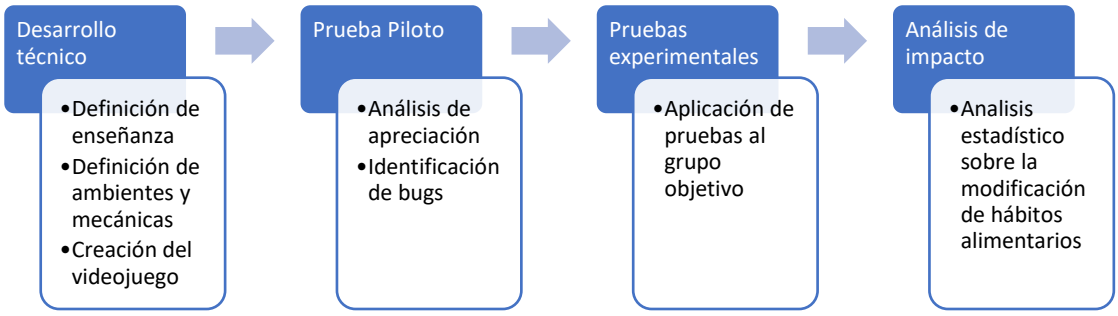


Figura 1. Etapas generales en el desarrollo de un SG nutricional

2.1 Desarrollo técnico

Las etapas para el desarrollo de un videojuego incluyen la preproducción (o planeación), producción y postproducción [17], tal como se muestra en la Figura 2. Cada una de estas etapas está definida dentro de lo que se conoce como *Game Desing Document* (GDD); el cual, es un documento dinámico que funciona como guía de las actividades necesarias y conceptos requeridos para el desarrollo de un videojuego. Cabe resaltar, que dentro del GDD se engloban todos los aspectos importantes en las tres etapas del desarrollo del videojuego.

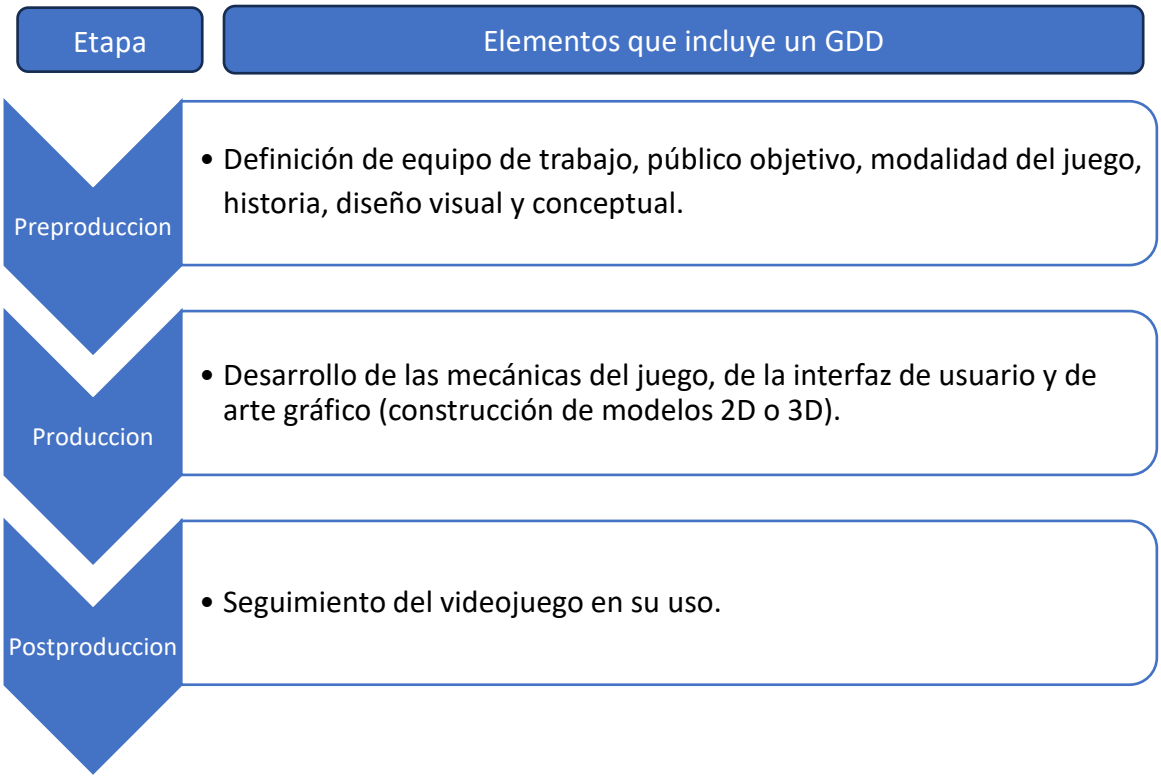


Figura 2. Relación con las etapas y el GDD.

La preproducción o planeación es la etapa no tangible del producto final; es decir, la elaboración del diseño conceptual. Aquí se definen las bases que se desean para el videojuego. La planeación no solo contempla el apartado técnico, también se involucran los recursos financieros, humanos y tecnológicos disponibles. Por un lado, el desarrollo de un videojuego comercial posee tiempo y un equipo de trabajo considerable para lograr un producto aceptable y económicamente viable. Por otro lado, desde la perspectiva del desarrollo de un SG con fines no lucrativos, existen algunas limitaciones humanas y financieras, las cuales deben ponerse a consideración al momento de la planeación. El Marketing, la investigación del mercado, líneas de distribución y atención al cliente, son elementos que no son necesarios dentro de un SG, sin embargo, aquellos elementos que si son imprescindibles y deben ser planeados y canalizados en la etapa de preproducción son:

- Público objetivo: Un SG nutricional debe diseñarse con base en quién es el jugador y sus características demográficas, es decir, su etapa de desarrollo (edad), si cuenta con algún tipo de enfermedad, como desórdenes alimenticios o diabetes, educación, e incluso su entorno de desarrollo. Esta información es muy relevante pues da la pauta inicial sobre el diseño del SG.
- Motor de videojuego: Aquí se elige el software de desarrollo que sea capaz de incorporar los diferentes elementos que darán vida al videojuego, tales como modelos 2D/3D, simulación de físicas, audio, animaciones, inteligencia artificial, entre otras. Actualmente los motores de juego Unreal Engine y Unity son parte de los grandes motores que destacan.
- Género: Es la categoría o tipo de juego que se desea crear. Algunos géneros comunes incluyen juegos de tipo plataformero, juegos de acertijos, carreras y juegos de estrategia. Para el caso de SG, y considerando que se va a centrar el diseño en el público infantil, se deben evitar géneros de naturaleza violenta.
- Modalidad del juego: hace referencia si es para un solo jugador o multijugador.
- Historia. El contexto en el que se rige el videojuego, la creación de personajes, lugares y la historia de estos. Aquí, generalmente se busca que el jugador sienta empatía por los personajes y la historia, lo que se logra una vez que este se identifica con el contenido presentado.
- Investigación temática: Hace referencia a los conocimientos necesarios para poder desarrollar la historia o aprendizaje que se desea proyectar en el videojuego. Para el escenario específico de nutrición algunos temas de interés puede ser el plato del bien comer y el valor nutricional en los alimentos. Estos temas permitirán crear un panorama amplio y completo sobre qué información y de qué manera se debe poner al alcance de los usuarios a través del videojuego.
- Diseño visual: en este apartado se brinda la apariencia deseada al videojuego. Se definen características de diseño para los objetos, personajes y escenarios, lo que puede incluir las dimensiones de los gráficos (2D o 3D), así como el estilo artístico (realista, de caricatura, minimalista, etc.).
- Mecánicas del juego: Son las reglas en las que se basa el videojuego, es decir, se definen qué acciones puede realizar el jugador, cuál es el sistema de puntaje, cuáles son los objetivos del juego, qué herramientas y objetos puede o no puede manipular el jugador, entre otros.

La etapa de producción consiste en materializar las características y elementos definidos en la etapa de preproducción. Para ello se emplean diferentes softwares para la creación de contenido. De forma general, un videojuego es la unión de tres componentes: modelos 2D o 3D que incluyen a personajes, objetos y escenarios, códigos de programación que definen el comportamiento de todos los elementos que se integran en el videojuego; y el conjunto de elementos sonoros y animaciones. Dichos componentes trabajan conjuntamente y se incorporan dentro de un motor de videojuego. Cabe resaltar, que los desarrolladores deben crear dichos componentes empleando programas con los que estén familiarizados y les permitan realizar un trabajo eficiente.

Durante la creación de un videojuego, este atraviesa tres versiones llamadas: prototipo, beta y alfa. Estas versiones y su objetivo principal se muestran en la Figura 3. También es imprescindible el

desarrollo de la interfaz de usuario, esta es el conjunto de texto, botones, símbolos o colores que permiten al usuario tener comunicación de forma eficaz con el software.

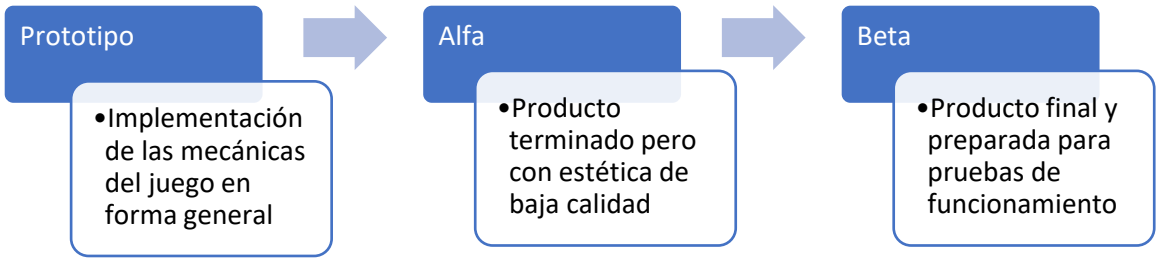


Figura 3. Ejemplificación de las etapas de la producción de un videojuego

La versión de prototipo, o demo, consiste en el desarrollo de las mecánicas principales del juego sin prestar demasiada atención a los detalles en escenarios, colores o historia. Es decir, generalmente durante esta fase se trabaja con modelos genéricos, pues la finalidad es visualizar de manera general el producto.

La versión alfa presenta un producto casi terminado, salvo por la falta de algunos detalles escénicos que sirven para la decoración, pero no restan funcionalidad al juego. Esta versión trabaja conjuntamente los modelos y programación necesarios, así como con la inclusión de elementos sonoros, efectos y de la interfaz de usuario. Es preciso aplicar una serie de pruebas por parte del propio equipo de trabajo hacia el producto con la finalidad de mejorar o corregir errores del videojuego.

Finalmente, para la versión beta del videojuego, ya se cuenta con un producto concluido y con los detalles escénicos, artísticos y funcionales totalmente terminados. Para la evaluación de esta versión se acostumbra a recurrir a gente externa al proyecto, esto dado que es importante contar con un punto de vista imparcial y veraz sobre el producto, intentando que el videojuego llegue al usuario final con la menor cantidad posible de defectos.

La posproducción para una empresa desarrolladora de videojuegos consiste en dar un seguimiento del producto una vez que éste sale al mercado, lo que incluya tareas como lanzar actualizaciones o expansiones y mantener una atención al cliente. Para el caso de un SG, se debe dar seguimiento técnico y corrección de errores si el videojuego lo amerita. Esto se puede lograr a través de pruebas piloto y experimentales que proporcionen a los desarrolladores información que permita conocer si el videojuego cumple con el elemento divertido y si el usuario presenta mejoras en sus hábitos de consumo.

2.2 Pruebas piloto

Durante esta etapa, la versión alfa del videojuego es presentada a un grupo pequeño de usuarios para conocer su apreciación y experiencia inicial con el producto. Con la finalidad de conocer cualitativamente este nivel de apreciación, al final del uso del videojuego se le solicita a cada usuario que responda una encuesta tipo Likert. Esta encuesta generalmente presenta las siguientes preguntas [18]:

a) ¿Te gustó el juego?
b) ¿Fue entretenido?
c) ¿En algún momento te frustraste?

d) ¿Fue aburrido?
e) ¿La dificultad fue adecuada?
f) ¿Lo recomendarías a tus amigos?

Con base en esto, los desarrolladores pueden conocer si el videojuego cumple con el apartado lúdico, así como obtener información sobre errores dentro del juego y posibles mejoras de este.

2.3 Diseño experimental

Con la finalidad de validar el impacto que tiene un SG en el área para la cual fue creado, se requiere hacer un análisis profundo sobre el aprendizaje y experiencia de uso con participantes que cumplan con las características del público afín al SG. Los parámetros que se deben considerar para esta valoración deben incluir:

- Tipo de experimento (experimental).
- Número de participantes
- Criterios de inclusión y exclusión
- Descripción sociodemográfica de participantes
- Identificación de variables independientes y dependientes
- Definición de instrumentos de evaluación
- Duración de la intervención
- Análisis estadístico

Dentro de este tipo de estudios que hacen uso de SG como una herramienta de intervención, se acostumbra a trabajar con experimentos de tipo comparación dependiente (cuando solo se tiene un solo grupo) o independiente (se tiene dos grupos diferentes entre sí). Si se considera que el objetivo principal de la intervención con el SG para la educación en la Nutrición busca fomentar mejores hábitos alimentarios entre los jugadores, entonces, tomando el tipo de experimento de comparación dependiente, se haría una comprobación entre los hábitos alimentarios de un mismo grupo de estudio antes y después de utilizar el SG durante un periodo de tiempo (tiempo de intervención). Por otro lado, si se considera un experimento de tipo independiente, sería necesario crear un grupo de control y otro más de intervención. El primer grupo sería el punto cero o de referencia, es decir, participantes que no hacen uso del SG, o, en otras palabras, donde no se debería presentar el efecto deseado del programa de intervención. En el caso del segundo grupo, el grupo de intervención estaría sujeto a un periodo de intervención a través del uso del SG. Al final, se compara si existen diferencias estadísticamente significativas entre ambos grupos.

Para medir si un SG tiene potencial para influir en la apropiación de un hábito benéfico para la salud, un nuevo comportamiento que refleje un mejor estado del participante, o si se logró un aprendizaje de alguna habilidad o en el dominio del conocimiento, se puede recurrir a diferentes instrumentos para valorar esta mejora o permanencia de la condición. Estos instrumentos pueden incluir exámenes de conocimientos, pruebas psicológicas estandarizadas, cuestionarios sobre hábitos, entre otros. Considerando el objetivo de este trabajo, se cree que el empleo del “Recordatorio de 24 horas” sobre el consumo de alimentos de los participantes, así como entrevistas personales a los padres de familia servirán para conocer los hábitos alimentarios de los usuarios. Dado que el enfoque del SG está orientado a menores de edad, involucrar a los padres permite una mayor fluidez de información sobre los alimentos consumidos por los niños. Además, para extender el conocimiento sobre los efectos alcanzados, se podría recurrir a una “Encuesta de conocimiento nutricional básico”, para identificar si los participantes pueden reconocer los beneficios y características de los alimentos que podrían consumir en su dieta diaria.

. En la Tabla 1 se muestra como referencia algunos SG sobre nutrición infantil que se han desarrollado y aplicado pruebas experimentales para comprobar su efectividad.

Tabla 1. Ejemplos de Serious Game [18 - 20].

Año	País	Muestra	Edades	Sesiones	Serious Game	Herramienta estadística
2022	Australia	169	9-12	2 sesiones (20 minutos)	VitaVillage	Prueba t no pareada
2020	España	112	9-12	3 sesiones (1 hora)	Plataforma Web	ANOVA y t pareada
2020	Canadá	73	8-10	5 sesiones (15 minutos)	FoodFactory	ANOVA y t no pareada
2019	Alemania	83	12-14	3 sesiones (15 minutos)	Fit, Food, Fun	Prueba t pareada
2018	Italia	79	9-13	1 semana	Gustavo in Grams Planet	Suma de rangos con signo de Wilcoxon
2018	Países Bajos	108	10-13	2 sesiones (30 minutos)	Feed the Alien!	RMANOVA

Diversos autores [18 - 20] muestran un trabajo conjunto entre instituciones educativas y padres de familia para crear el ambiente necesario para la realización de pruebas experimentales. Así mismo, el método mayormente empleado es el pre-post intervención de comparaciones independientes, debido a que este tipo de prueba aporta resultados potencialmente confiables para concluir si la plataforma diseña presenta lo necesario para funcionar como herramienta de prevención de sobrepeso y obesidad

Los criterios de selección y exclusión deben analizar particularmente en cada caso con base en las necesidades geográficas y objetivos del estudio. Por ejemplo, Domínguez-Rodríguez indica que los participantes deben ser niños (de cualquier sexo) entre los rangos de 9 – 12 años y deben ser estudiantes regulares [18]. Por otro lado, se indica que los participantes seleccionados deberían saber leer y escribir fluidamente en inglés [19]. Para ambos casos, los autores indican la importancia del consentimiento informado por parte de los padre o tutores antes de comenzar con las pruebas.

Como se puede observar en la Tabla 1, el tamaño de la muestra es variada con una media de 104, las edades oscilan entre 8 y 14 años y la duración de las sesiones son cortas. Con la finalidad de analizar los datos estadísticos y determinar si existen diferencias significativas, se suele emplear una prueba *t* no pareada si los datos son paramétricos. En caso contrario, se emplea una prueba de suma de rangos con signo de Wilcoxon, esto ya que los datos son no paramétricos. De manera general, los autores concluyen que el empleo de un SG posee el potencial para ser una herramienta para lograr un cambio en los hábitos alimentarios, como lo es un mayor consumo de alimentos más sanos que incluyen frutas, verduras y legumbres [18 – 20]. A pesar de esto, también se menciona que es necesario una mayor homogeneidad entre los diferentes estudios de este tipo, para tener comparaciones más certeras; así como un seguimiento a largo plazo para corroborar un duradero cambio en los hábitos alimentarios.

3. Resultados

En esta sección se muestra a modo de ejemplo el desarrollo en etapa de prototipo de un SG para educación en Nutrición orientado a un público infantil entre los 6 y 12 años. Para lograr el impacto deseado, el proyecto se ha ido acompañando de un equipo de nutriólogos que permitan construir el repertorio adecuado para la adopción de buenos hábitos alimentarios.

Como primer paso en el desarrollo del SG, se debió elegir un motor de juego adecuado, con base en los diferentes motores existentes, se optó por utilizar Unity ya que es intuitivo y existe una gran cantidad de información en medios digitales para su utilización, además no requiere de requisitos exigentes por parte del equipo de cómputo para obtener resultados de buena calidad.

Unity permite diseñar videojuegos para distintas plataformas como son dispositivos móviles, equipos de cómputo o para consolas de videojuegos. Además, ofrece una gran versatilidad dado que se pueden crear proyectos de cualquier género, ámbito o sector. Dentro de Unity se pueden crear juegos en 2D, 3D o incluso con realidad aumentada y realidad virtual. A esto se suma que Unity cuenta con una licencia gratuita para fines personales y sin fines de lucro.

Dado que el SG está orientado a un público infantil, se podría recurrir a estilos de juego tipo plataformero, juegos de acertijos, o incluso una combinación de ellos. Ya que el SG en desarrollo busca trabajar con el sistema de recompensas y familiaridad con el personaje del juego, se optó por la planeación y desarrollo de un género plataformero.

Las mecánicas de juego son de los elementos que más se deben trabajar dentro de un SG, pues dichas mecánicas funcionan como un intermediario entre la diversión, el conocimiento, el desarrollo de habilidades, que en conjunto mantienen al jugador cautivo de la experiencia. Para este proyecto en particular, las mecánicas de juego que se proponen para el desarrollo de la versión inicial del SG para la educación en Nutrición incluyen:

- Sistema de recompensas o restricciones con base en la recolección de alimentos.
- Sistema de puntaje basado en la resolución de puzzles o acertijos sobre datos básicos de una alimentación saludable.
- Efectos y animaciones que sirvan de recordatorios y consejos sobre prácticas saludables de alimentación.
- Sistema de logro con base en el desbloqueo de secciones del plato del bien comer.
- Adecuación de la dificultad del videojuego con base en las decisiones nutricionales del jugador, esto tras construir una comida (vea Figura 4).

Con la finalidad de poner el SG al alcance de la mayoría de la población infantil sin necesidad de contar con un sistema de cómputo de grandes prestaciones, se optó por desarrollar el SG utilizando modelos en 2D. Dentro del juego, el participante podrá encontrar elementos como personajes, elementos para interactuar y de escenario como los mostrados en la Figura 5. Un ejemplo de todos estos elementos actuando en conjunto puede ser apreciado en la captura de pantalla de la Figura 6. Cabe resaltar que los 4 modelos presentados en la Figura 5, han permitido la creación de diferentes niveles de tipo plataforma para el SG.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 4, pp. 33 - 46.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Figura 4. Recordatorio de 24 horas dentro del juego

a) Elementos de escenario

b) Personaje

c) Fondo del escenario

d) Plantillas para escenario

Figura 5. Modelos en 2D para creación de SG.

Durante el uso del SG el jugador podrá acceder a diferentes menús, niveles, tareas y configuraciones, es muy importante que en la etapa de planeación y desarrollo del videojuego se elabore un diagrama del Estado del Juego. Dentro de este diagrama se plasma la secuencia de pasos que experimentará el jugador para acceder a cada una de las características del videojuego, el cual se muestra en la Figura 7 para el SG presentado en este trabajo. Por ejemplo, cada vez que un participante inicie una “Nueva Partida”, inmediatamente éste podrá visualizar en pantalla un plato para incorporar los alimentos que consumió antes de hacer uso del juego (vea Figura 4). Una vez concluida esta etapa, el jugador podrá elegir un nivel que ya haya desbloqueado para continuar la historia del juego, en este caso se propone la creación de niveles basados en el plato del bien comer, tal como se muestra en la Figura 8.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 4, pp. 33 - 46.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

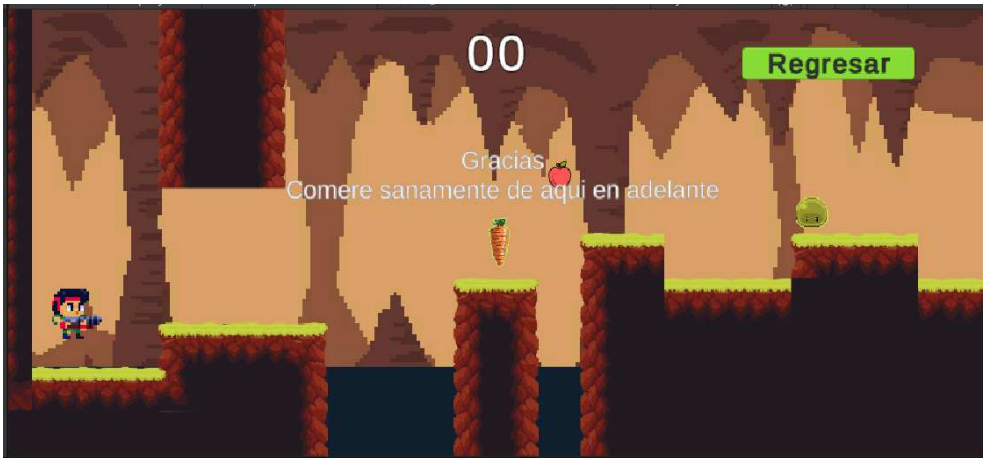


Figura 6. Uso de consejos dentro de un SG nutricional

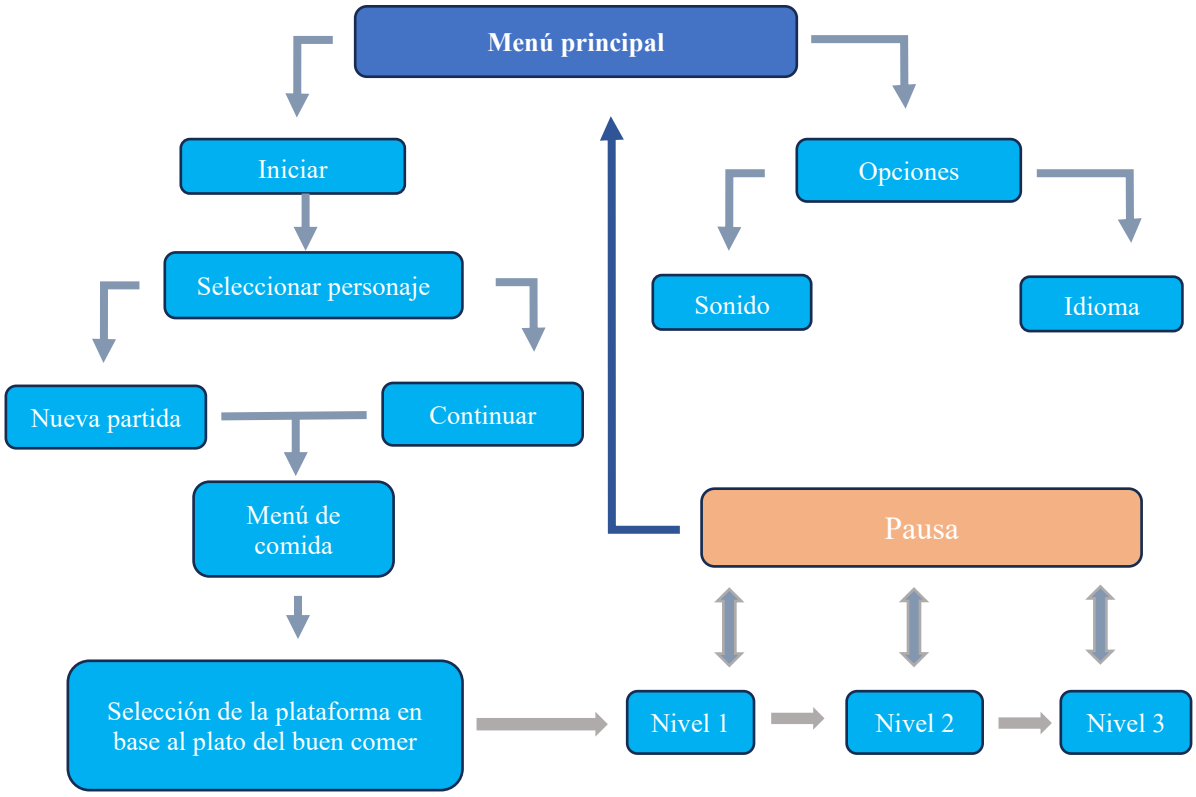


Figura 7. Ejemplo de un diagrama de estado de juego

Una vez que se tiene presente el diagrama de estado del juego, se crean los diferentes escenarios y se enlazan mediante el desarrollo de botones o eventos dentro del juego que permitan moverse al jugador de una escena a otra. Es muy importante resaltar que, en este diagrama, además de ayudar en la navegabilidad del jugador, le permite al desarrollador identificar aquellos elementos relevantes que deben ser colocados en la interfaz de usuario para cada una de las distintas etapas de uso del videojuego.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 4, pp. 33 - 46.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

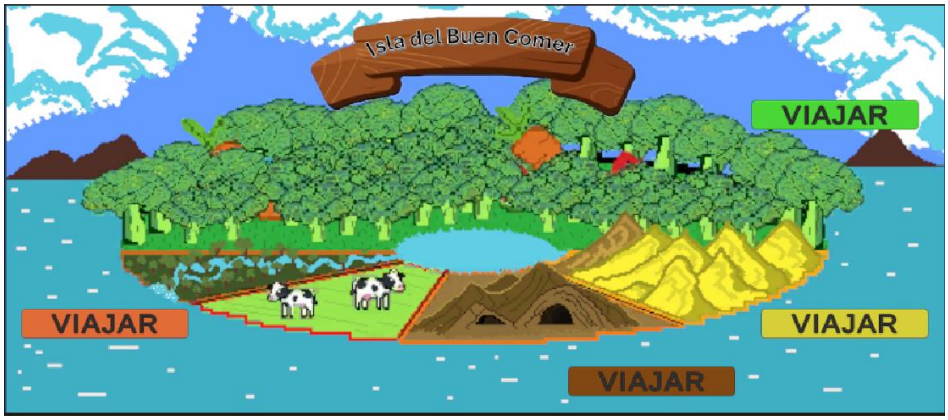


Figura 8. Selección del nivel en base al plato del buen comer

4. Conclusiones

El desarrollo de SG para la educación en Nutrición es un proceso de larga duración y complejo, dado la naturaleza propia de la creación de un videojuego. Pues tal como se ha revisado, la creación de un videojuego conlleva un análisis profundo sobre la disponibilidad de recursos humanos, tecnológicos, infraestructura y tiempo. En México, se ha encontrado que hay un avance muy escaso sobre la elaboración de este tipo de propuestas para su implementación en programas de prevención de la obesidad y sobrepeso. Por ejemplo, se desarrolló un SG donde el usuario determina si los alimentos preparados por un chef son saludables o no saludables, el objetivo de dicho estudio es la relación aprendizaje–satisfacción del usuario [21].

Es muy importante resaltar que, si se fortalecieran los programas de prevención del sobrepeso y obesidad con el uso de herramientas digitales desde edades muy tempranas como la infancia, podría lograrse el objetivo de perseverar la adopción de buenos hábitos alimentarios para llevar siempre una dieta saludable en la edad adulta [11]. Otro reto importante que enfrentan los programas de prevención del sobrepeso y la obesidad radica en lograr que los padres de los menores también se involucren, pues son ellos quienes proveen de manera directa o indirecta la alimentación de la niña o niño. Así, se podría ampliar el panorama del uso de herramientas digitales que no sólo le permitan a la niña o el niño jugar y aprender, sino que incluso los padres puedan acceder a este conocimiento para ponerlo en práctica, además de poder dar un seguimiento a la evolución de sus hijos.

Aunque el diseño y desarrollo de un SG es muy similar al desarrollo técnico de un videojuego convencional, se pueden absortar algunos elementos, así como la inclusión de otros. De esta experiencia de desarrollo de un SG se puede resaltar que es importante una correcta planeación del diseño y el desarrollo, tomando en cuenta un enfoque de “diseño centrado en el usuario” muy particular, pues se busca abordar grupos sociales que requieren de algún tipo de asistencia para la apropiación de un hábito o desarrollo de una habilidad. Con base en esto, es posible conocer qué tipo de juego sería más adecuado de crear, las mecánicas del juego, el diseño visual y las reglas generales. Asimismo, se identificó que es muy importante pasar por las fases de desarrollo de prototipo, alfa y beta, las cuales son esenciales para conocer las mejoras requeridas para alcanzar el objetivo del SG.

Para la plataforma podemos destacar la importancia del desarrollo de buenas mecánicas de juego y no solo presentar juegos que busquen que el video jugador aprenda de manera directa cuales son los alimentos de una dieta balanceada [19]. Las mecánicas de juego enlazan el aprendizaje de conocimientos y habilidades deseadas con la diversión, se da la propuesta de mecánicas interesantes como resolución de acertijos con base en el plato del bien comer o la selección de la dificultad con relación a la alimentación que el jugador le proporciona a su avatar. La finalidad de estas mecánicas es que el usuario aprenda de manera implícita y de manera lúdica.

Al final, se espera que, con el diseño del SG propuesto y tras la realización de las pruebas experimentales del SG en desarrollo, permitan validar el alcance del propósito del SG, que es mejorar los hábitos alimentarios de la población infantil. Una extensión de este estudio que se desea realizar será el análisis a largo plazo sobre los efectos que tuvo el SG dentro de los grupos intervenidos, pues un logro muy importante de esta herramienta sería la preservación de los hábitos alimentarios de los participantes durante las etapas posteriores de su vida.

Referencias

[1] Gallego - Durán, F. J., Villagrá-Arnedo, C. J., Satorre Cuerda, R., Compañ, P., Molina-Carmona, R., & Llorens Largo, F. (2014). Panorámica: serious games, gamification y mucho más.

[2] Marcano, B. (2008). Juegos serios y entrenamiento en la sociedad digital. Revista Electrónica Teoría de la Educación: Educación y Cultura en la Sociedad de la Información, vol. 9, núm. 3, pp. 93-107.

[3] Gómez, M. S. (2007). Buenas Prácticas en la Creación de Serious Games (Objetos de Aprendizaje Reutilizables). In *SPDECE*

[4] Baranowski T, Baranowski J, Thompson D, Buday R, Jago R, Griffith MJ, et al. Video game play, child diet, and physical activity behavior change: A randomized clinical trial. Am J Prev Med. [Internet]. 2011[cited 2017 Sep 15];40(1)33–8.

[5] Ladino-Cañas, P. K., & Caicedo-Eraso, J. C. (2021). Use of Serious Video Games in Health Sciences. In *Salud Uninorte* (Vol. 37, Issue 3, pp. 779–800). Universidad del Norte. https://doi.org/10.14482/sun.37.3.615.851

[6] Derksen, M. E., Van Strijp, S., Kunst, A. E., Daams, J. G., Jaspers, M. W., & Fransen, M. P. (2020). Serious games for smoking prevention and cessation: A systematic review of game elements and game effects. *Journal of the American Medical Informatics Association*, *27*(5), 818-833.

[7] Domínguez, T. R., Banda, R. G., Morán, J. F. O., Muñoz, M. S., & Pagador, B. (2021). Aplicación de" serious games" en el tratamiento de la demencia: revisión sistemática. *Revista INFAD de Psicología. International Journal of Developmental and Educational Psychology.*, *3*(2), 71-84.

[8] Sanjaya, R. B. Y. R., Kurniawan, R., Mulyati, S., Putra, K. E. N. C., & Rakhmawati, R. (2023). Serious Game to Training Focus for Children with Attention Deficit Hyperactivity Disorder:“Tanji Adventure to the Diamond Temple”. *Khazanah Informatika: Jurnal Ilmu Komputer dan Informatika*, *9*(1)

[9] Secretaria de Salud. (2023). *GUÍAS ALIMENTARIAS SALUDABLES Y SOSTENIBLES PARA LA POBLACIÓN MEXICANA*.

[10] Pérez-Herrera, A., & Cruz-López, M. (2019). Situación actual de la obesidad infantil en México. *Nutrición hospitalaria*, *36*(2), 463-469.

[11] Quizán-Plata, T., Meneses, L. V., Romero, J. E., Villar, A. V. B., & Giovanni Diaz Zavala, R. (2014a). Programa educativo afecta positivamente el consumo de grasa, frutas, verduras y actividad física en escolares mexicanos. *Nutricion Hospitalaria*, *30*(3), 552–561. https://doi.org/10.3305/nh.2014.30.3.7438

[12] Mercado, P. y Vilchis, G. (2013). La obesidad infantil en México. Alternativas en Psicología, 17(28), 49-57.

[13] Trinidad, J. (2020). Causas y consecuencias del sobrepeso. *Revista de Educação e Humanidades*.

[14] Liria, R. (2012). *Consecuencias de la obesidad en el niño y el adolescente: un problema que requiere atención CONSEQUENCES OF OBESITY IN CHILDREN AND TEENAGERS: A PROBLEM THAT REQUIRES ATTENTION*.

[15] Manrubia Pereira, A. M. (2014): El proceso productivo del videojuego: fases de producción. Historia y Comunicación Social ,19, 791-805. Universidad Complutense de Madrid.

[16] Massa, S. M., Evans, F., Spinelli, A., Zapirain, E., Rico, C., Morcela, O. A., & Kühn, F. (2018). Modelos y herramientas para el proceso de desarrollo de Serious Games. In *XX Workshop de*

Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2018, Universidad Nacional del Nordeste).

[17] Scott, R. (2010). Level UP - The Guide to Great Game Design. John Wiley & Sons.

[18] Domínguez-Rodríguez, A., Cebolla, A., Oliver, E., Navarro, J., & Baños, R. (2020). Efficacy and acceptability of a web platform to teach nutrition education to children. *Nutricion Hospitalaria*, *37*(6), 1107–1117. https://doi.org/10.20960/nh.03188

[19] Froome, H. M., Townson, C., Rhodes, S., Franco-Arellano, B., Lesage, A., Savaglio, R., Brown, J. M., Hughes, J., Kapralos, B., & Arcand, J. (2020). The effectiveness of the foodbot factory mobile serious game on increasing nutrition knowledge in children. *Nutrients*, *12*(11), 1–14. https://doi.org/10.3390/nu12113413

[20] de Vlieger, N. M., Sainsbury, L., Smith, S. P., Riley, N., Miller, A., Collins, C. E., & Bucher, T. (2022). Feasibility and acceptability of 'vitavillage': A serious game for nutrition education. *Nutrients*, *14*(1). https://doi.org/10.3390/nu14010189

[21] Espinosa-Curiel, I. E., Pozas-Bogarin, E. E., Martínez-Miranda, J., & Pérez-Espinosa, H. (2020). Relationship between children's enjoyment, user experience satisfaction, and learning in a serious video game for nutrition education: empirical pilot study. *JMIR Serious Games*, *8*(3), e21813

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 5, pp. 47 - 58.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Diseño y Validación de un Robot Autónomo Limpiador de Playa

Reveles Martínez Rafael[1], Burciaga Sosa Sebastián[1], Hernández Esquivel Jorge Eduardo[1], Romo Castañeda Francisco Emiliano[1], Jaramillo Martínez Ramón[1] y Moreno Castro Addried Samir[1].

Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas., Zacatecas, México
Correo: rrevelesm@ipn.mx

Resumen

En este documento se presenta el diseño y la validación de un robot móvil autónomo destinado a la recolección de envases PET en terrenos arenosos irregulares. El robot fue diseñado con un chasis de aluminio ligero y resistente, validado mediante análisis de elementos finitos (FEA). Los resultados del análisis de von Mises mostraron que en la estructura no se producirá pandeo bajo las condiciones operativas previstas.

El sistema de locomoción utiliza motores de corriente continua con un torque nominal de 1 Nm, seleccionado mediante simulaciones dinámicas para garantizar la tracción adecuada en arena suelta y compacta. Las pruebas de tracción y movilidad confirmaron que el robot puede superar pendientes de hasta 20 grados sin pérdida de estabilidad. Para la recolección de envases PET, se diseñó un mecanismo basado en actuadores lineales y una pinza adaptativa. Además de la integración de sensores RGB-D y LIDAR permite la navegación autónoma y la identificación precisa de objetos.

Este diseño y validación demuestran la viabilidad del robot para aplicaciones en entornos de playa, proporcionando una solución robusta y eficiente para la recolección automatizada de residuos.

Palabras clave: Arena, botella de plástico, visión artificial, recolección, robot móvil, robot autónomo.

1. Introducción

A lo largo de los años se ha evidenciado la contaminación que la humanidad ha generado, particularmente en el manejo de los plásticos, los cuales provocan pérdidas en la biodiversidad, pues la ingesta de estos polímeros hecha por animales provoca laceraciones o incluso la muerte, así como también la importancia de disminuir la huella ecológica [1]. Cabe destacar que durante la pandemia de COVID-19 aumentó el consumo de los plásticos descartables usados en las actividades diarias, así como médicas [2].

En el esfuerzo por contrarrestar esta problemática, se desarrolló el proyecto del robot autónomo limpiador de playa, que tiene como propósito presentar una solución eficiente e innovadora para la limpieza de costas sin intervención humana directa, centrándose en la reducción de la presencia de residuos de envase. Tomando en cuenta que las playas mexicanas están llenas de micro plásticos, particularmente de fibras plásticas provenientes de artes de pesca, el turismo y del impacto de los empaques y embalajes utilizados por las personas, pues estudios realizados en las costas de Carolina del Norte han dado a conocer que en más del 50% de las aves marinas se han encontrado micro plásticos en sus estómagos [3].

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 5, pp. 47 - 58.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

El proyecto consiste en un sistema mecatrónico conformado por cuatros subsistemas: un mecanismo de locomoción que permita la movilidad del robot a través de un terreno irregular arenoso, un sistema sensorial que por medio de técnicas de visión artificial y fusión de sensores brinde la capacidad de percepción y procesamiento del entorno, un sistema de control que permitirá la autonomía del robot por medio de algoritmos de navegación y procesamiento de la información y finalmente un sistema eléctrico diseñado para una suministración de energía efectiva para el correcto funcionamiento de los diferentes subsistemas.

La combinación de estos sistemas permitirá la creación de un robot eficiente y adaptable a las condiciones de terreno y clima propias de una costa de playa.

2. Metodología

El diseño se realizó tomando en cuenta un método enfocado a la mecatrónica para diseñar el robot autónomo limpiador de playa. El cual cuenta con una estructura que permita recolectar, almacenar y transportar un volumen mayor a 3000 m^2, con un suministro de energía que permita un periodo de trabajo mínimo de 20 minutos, a su vez se adaptó un sistema de sensores para detectar y medir la distancia de los envases identificados en el terreno arenoso, por lo cual el robot se diseñó con motores que permitan desplazarse en el terreno irregular.

2.1 Modelado

Mediante la metodología IDEF-0 se definió el proceso que debe de seguir el robot para el funcionamiento deseado, con el objetivo de esclarecer los parámetros a considerar y las necesidades a cubrir para el desarrollo del robot autónomo, como se puede ver en la Figura 1.

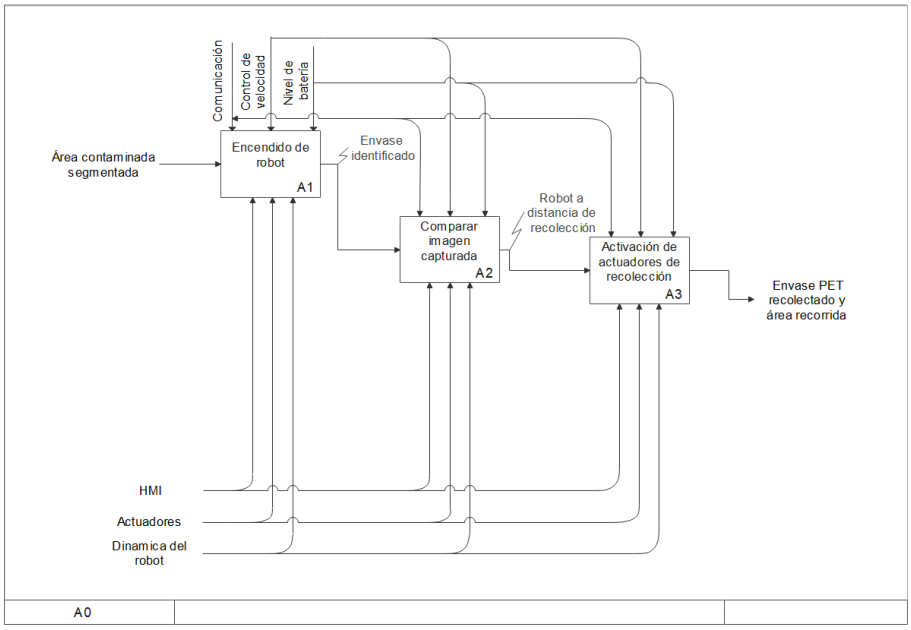


Figura 1. Diagrama A0: Proceso de funcionamiento.

Los subprocesos se describen a continuación:

A1 - Encendido de robot: Mediante una señal de inicialización, el sistema ejecuta operaciones iniciales como la calibración de sensores y actuadores.

A2 - Comparar imagen capturada: Compara en la base de datos la imagen que captura mediante la cámara y determina si el objeto visualizado es de interés para ser recolectado.

A3 - Activación de actuadores de recolección: Activa el mecanismo de recolección del sistema para recolectar el envase PET y colocarlo en el depósito.

2.2 Diseño Mecánico

Debido a que el robot debe de recolectar los envases es importante conocer el tipo de cargas que los brazos de recolección del robot pueden mover, es necesario realizar los cálculos necesarios, tomando en cuenta los siguientes puntos mostrados (Figura 2).

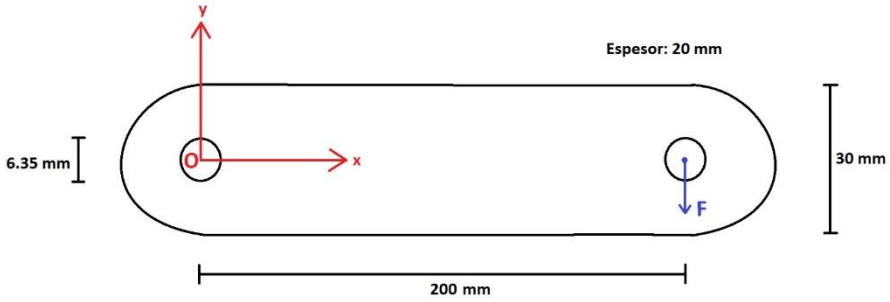


Figura 2. Diagrama de fuerzas.

Calculando la fuerza que ejerce el sistema de recolección (*F*), a partir del peso de la botella recolectada (*PR*), sumado al peso del brazo (*PB*) y multiplicado por la gravedad (*g*), a partir de la ecuación (1).

$$F = (P_B + P_R) \cdot g$$
$$F = (1.100\ kg + 0.030\ kg)\left(9.810\ \frac{m}{s}\right) = 12.753\ kgf \tag{1}$$

Después se procede al cálculo del momento ocasionado por esta fuerza (*MO*), para esto es necesario multiplicar la fuerza que ejerce el sistema de recolección (*F*) por la distancia del brazo (*l*), cálculo realizado mediante la ecuación (2).

$$M_O = (F \cdot l)$$
$$M_O = (12.753\ kgf)(0.200\ m) = 2.551\ kg\ m \tag{2}$$

Procedemos a realizar el cálculo del esfuerzo nominal (*σO*), para el cual previamente debemos obtener el valor de la inercia (*I*), el cual se muestra mediante la ecuación (3). Para el cálculo de la inercia consideramos los valores del ancho del brazo (*w*), la distancia (*d*) y el espesor (*h*), donde se realizan los cálculos en sistema inglés para luego convertirlos a sistema internacional.

$$w = 0.030\ m = 1.181\ in$$
$$d = 0.00635\ m = 0.250\ in$$
$$h = 0.020\ m = 0.787\ in$$
$$I = \frac{(w-d)h^3}{12} \tag{3}$$

$$I = \frac{(1.181 - 0.250)(0.787)^3}{12} = 0.0378\ in^4$$

Una vez obtenida la inercia podemos calcular del esfuerzo nominal con la ecuación (4).

$$M_0 = 2.551\ kg\ m = 221.382\ lb\ in$$
$$\sigma_0 = \frac{M_0 \cdot \frac{W}{2}}{I} \tag{4}$$
$$I = \frac{(221.382\ lb\ in)(\frac{1.181\ in}{2})}{0.0378\ in^4} = 3.458\ kpsi = 23.842\ MPa$$

A continuación, se muestra los cálculos realizados para estimar el factor teórico de concentración del esfuerzo (*Kt*), mediante la ecuación (5). Para esto es necesario el uso de una gráfica de factor teóricos de concentración del esfuerzo para una barra rectangular con un agujero transversal en flexión [4]. Para esto es necesario contar con los valores de la distancia (*d*), el ancho (*w*) y el espesor (*h*), en unidades del sistema inglés.

$$\frac{d}{w} = \frac{\frac{2}{8}\ in}{1.181\ in} = 0.212$$
$$\frac{d}{h} = \frac{\frac{2}{8}\ in}{0.318\ in} = 0.318 \tag{5}$$

Resultando en un factor de concentración de esfuerzo de 2.19.

Para conocer el esfuerzo máximo (*σmax*), calculado mediante la ecuación (6) es necesario tener en cuenta las propiedades del material a emplear, se selecciona el aluminio 6061-T4, se investigó la resistencia a la tensión (*Sut*) y la resistencia a la fluencia (*Sy*), para lo cual se multiplico el factor teórico de concentración del esfuerzo (*Kt*) y el esfuerzo nominal (*σO*).

$$s_{ut} = 21\ kpsi = 144.79\ MPa$$
$$s_y = 14\ kpsi = 96.527\ MPa$$
$$\sigma_{max} = \sigma_0 \cdot K_t \tag{6}$$
$$\sigma_{max} = (23.842\ MPa)(2.19) = 52.214\ MPa$$

Finalizando con el valor del factor de seguridad (*ny*) calculado mediante la ecuación (7).

$$n_y = \frac{S_y}{\sigma_{max}}$$
$$n_y = \frac{96.527\ MPa}{52.214\ MPa} = 1.848 \tag{7}$$

Obteniendo un valor mayor a uno, el cual, en la teoría del análisis estático de von Mises, un valor mayor a la unidad representa una vida útil infinita para la pieza.

Para la estructura del robot, se seleccionó como material principal el aluminio 6061, esto debido a que el aluminio es más ligero que el acero, además que sus propiedades evitan una rápida corrosión, tomando en cuenta las condiciones a las que se pondrá a prueba al robot.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 5, pp. 47 - 58.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

A continuación, se muestran los elementos principales que componen la estructura del robot.

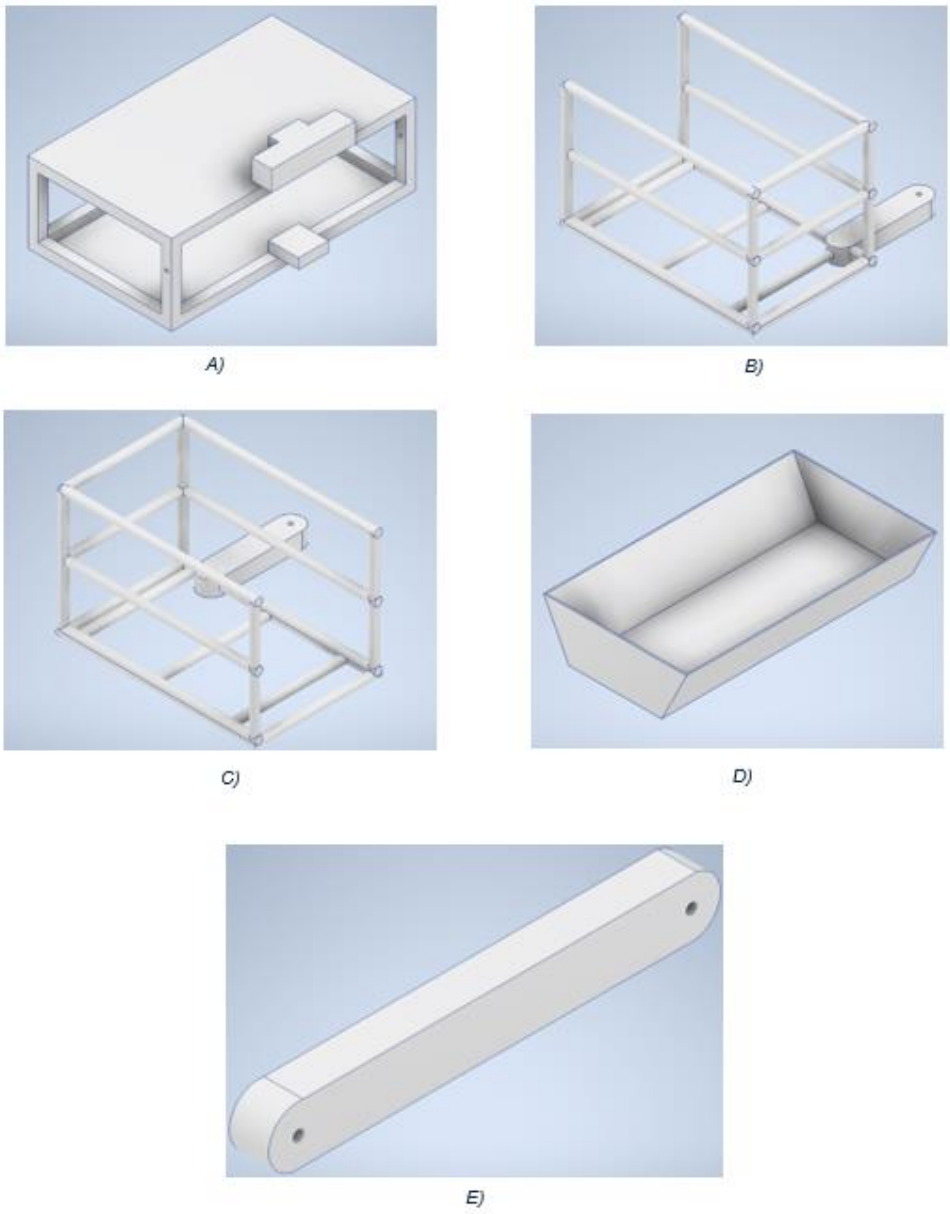


Figura 3. A) Chasis del robot. B) Canasta de recolección derecha. C) Canasta de recolección izquierda. D) Depósito de botellas. E) Brazo del sistema de recolección.

La figura 3A muestra el elemento principal de la estructura del robot. Esta base está compuesta de una estructura tubular de perfil de aluminio 6061, con medidas de 2x2 cm. Dentro de este se colocarán los componentes electrónicos que ayudarán al robot a identificar los envases y realizar la navegación de manera autónoma. La figura 3B y 3C muestran las canastas del sistema de recolección mediante las cuales se recogerán las botellas tras activar dos servomotores.
En la figura 3D se muestra el contenedor donde se depositarán las botellas tras ser recolectadas. Este contenedor tendrá una capacidad aproximada de 3500 cm^3. Por último, en la figura 3E se muestra el brazo del sistema de recolección mediante el cual se fijan las canastas a la base del robot y mediante servomotores se elevan para realizar el depósito de las botellas recolectadas.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 5, pp. 47 - 58.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

2.3 Selección de sensores

Debido a que se trata de un sistema autónomo debe de llevar a cabo tareas como lo son la detección, percepción, mapeo y localización del sistema, lo cual se realizará mediante sensores los cuales se pueden en la Tabla 1.

Tabla 1. Selección de sensores.

Aplicación	Sensores	Descripción
Conducción autónoma	LiDAR 2D, IMU	Fusión de sensores para la conducción autónoma con deep learning.
Detección de objetos	Cámara de profundidad	Ayuda a la detección de objetos salientes, además de aproximar la distancia en la que se encuentran
Odometría visual	LiDAR 2D, Cámara de profundidad, IMU	Ayudan para la estimación de la posición del robot durante la navegación.
Detección de obstáculos	Cumple con la capacidad de detectar personas	Cumple con la capacidad de detectar personas u obstáculos, así como estimar la distancia a la que se encuentran

2.4 Diseño Eléctrico

Para la selección adecuada de los motores es necesario conocer el par mínimo que estos deben de ejercer para que el movimiento del robot sea el adecuado, tomando en cuenta los siguientes puntos:

- Se considera una pendiente máxima de 20°, debido a posibles montículos.
- La masa máxima del prototipo se considera de 10 kg.
- El diámetro de las ruedas es de 13 cm.

A continuación, se muestra el diagrama de cuerpo libre (Figura 4):

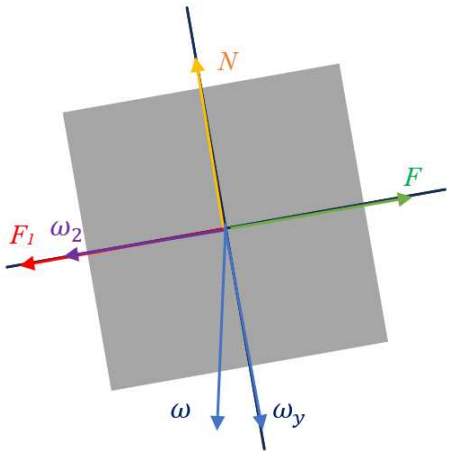


Figura 4. Diagrama de cuerpo libre.

La fuerza normal (*WN*) fue calculada con la ecuación (8), donde se relaciona la masa (*m*), la gravedad (*g*) y el coseno de la inclinación considerada.

$$W_N = m \cdot g \cdot cos\theta$$
$$W_N = (10\ kg)\left(9.810\frac{m}{s}\right)(\cos 20°) = 92.184\ N \quad (8)$$

La fuerza que se opone al movimiento (*f*) se expresa a partir de la ecuación (9).

$$f = m \cdot g \cdot cos\theta$$
$$f = (10\ kg)\left(9.810\frac{m}{s}\right)(\sin 20°) = 33.552\ N \quad (9)$$

Además, es necesario calcular la fuerza mínima (*Ftotal*) que se requiere para que el prototipo pueda desplazarse, a partir de la ecuación (10), donde es necesario conocer el coeficiente de resistencia a la rodadura (*RCC*) [5], el cual es de 0.3, considerando que la arena es la superficie.

$$F_{total} = RCC \cdot W_N + f$$
$$F_{total} = (0.300)(92.184\ N) + (33.552\ N) = 61.207\ N \quad (10)$$

Se calcula la potencia necesaria (*Ptotal*) para que el prototipo se desplace mediante la ecuación (11), donde es necesario considerar la velocidad del prototipo (*Vt*), la cual se relaciona con la distancia (*d*) sobre el tiempo (*t*), donde corresponde a la velocidad con la que el prototipo se desplazara, asignando un valor de 0.3 m/s.

$$P_{total} = F_{total} \cdot V_t$$
$$P_{total} = (61.207\ N)\left(0.300\frac{m}{s}\right) = 18.362\ W \quad (11)$$

Para conocer el valor de potencia por motor (*Pmotor*) se calcula a partir de la ecuación (12).

$$P_{motor} = \frac{P_{total}}{4}$$
$$P_{motor} = \frac{18.362\ W}{4} = 4.590\ W \quad (12)$$

Una vez conocido el valor de la potencia por motor, se calcula el par por motor (*τ*), a partir de la ecuación (14), donde primero es necesario conocer el valor de la velocidad angular del motor (*ω*), calculada por la ecuación (13), donde es necesario dividir la velocidad angular (*Vt*) sobre el valor del del radio de la rueda (*r*), el cual se considera de 0.065 m.

$$\omega = \frac{V_t}{r}$$
$$\omega = \frac{0.300\frac{m}{s}}{0.065\ m} = 4.615\frac{rad}{s} = 44.074\ rpm \quad (13)$$

$$\tau = \frac{P_{motor}}{\omega}$$
$$\tau = \frac{4.591\ W}{4.615\frac{rad}{s}} = 0.955\ Nm = 10.144\ kg\ cm \quad (14)$$

Gracias a la elaboración de estos cálculos obtiene el torque mínimo requerido para el funcionamiento esperado del robot, así como la potencia mínima requerida por cada motor.

Se enlistan los componentes necesarios para la realización del robot, los cuales cumplen con las características necesarias para el funcionamiento esperado.

- Cámara web - Intel RealSense D435.
- RPLIDAR C1 Sensor Lidar 2D.
- Motorreductor Pololu 37D.
- Pololu Dual VNH5019.
- Tecneu Servomotor Mg995.
- Jetson Orin Nano Kit.

Es necesario realizar una selección adecuada para la batería que alimentara el sistema eléctrico completo del robot, por lo cual es necesario conocer la potencia total que necesitara el sistema para operar lo cual se plasma en la Tabla 2, donde es necesario especificar que el tiempo de operación mínimo es de 20 minutos, lo cual es correspondiente a 0.334 horas. El robot consume 34.14 Wh en sus 20 minutos de funcionamiento, por lo cual es necesario calcular la capacidad de carga (Q), con por medio de la ecuación (15), donde se considera el consumo (E) y el voltaje (V), además se toma la consideración de un factor de seguridad de al menos 1.5.

Tabla 2. Consumo de energía del robot.

Cargas	Potencia (W)	Tiempo de operación (h)	Energía (Wh)
Motor 1	20.000	0.334	6.680
Motor 2	20.000	0.334	6.680
Motor 3	20.000	0.334	6.680
Motor 4	20.000	0.334	6.680
Servomotor 1	3.000	0.334	1.000
Servomotor 2	3.000	0.334	1.000
Servomotor 3	3.000	0.334	1.000
Servomotor 4	3.000	0.334	1.000
LiDAR 2D	0.216	0.334	0.072
Cámara	5.000	0.334	1.670
Jetson Nano	5.000	0.334	1.670
Total	102.216	-	34.140

$$Q = \frac{E}{V} \tag{15}$$

$$Q = \frac{34.14\ Wh}{12\ V} = 2.845\ Ah \approx 3000\ mAh\ (1.5) = 4500\ mAh$$

Con este cálculo se obtiene la energía necesaria para la operación del robot durante los 20 minutos establecidos, por lo cual se optó por seleccionar baterías Zeee, con las características señaladas en los cálculos.

3. Resultados

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 5, pp. 47 - 58.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Una vez analizados los componentes necesarios, así como los materiales de fabricación se realizó con ayuda un software de diseño asistido por computadora el diseño del robot, en el cual se agregaron los componentes a utilizar, así como su ubicación y la estructura con la que debe contar, como se puede ver en la Figura 5.

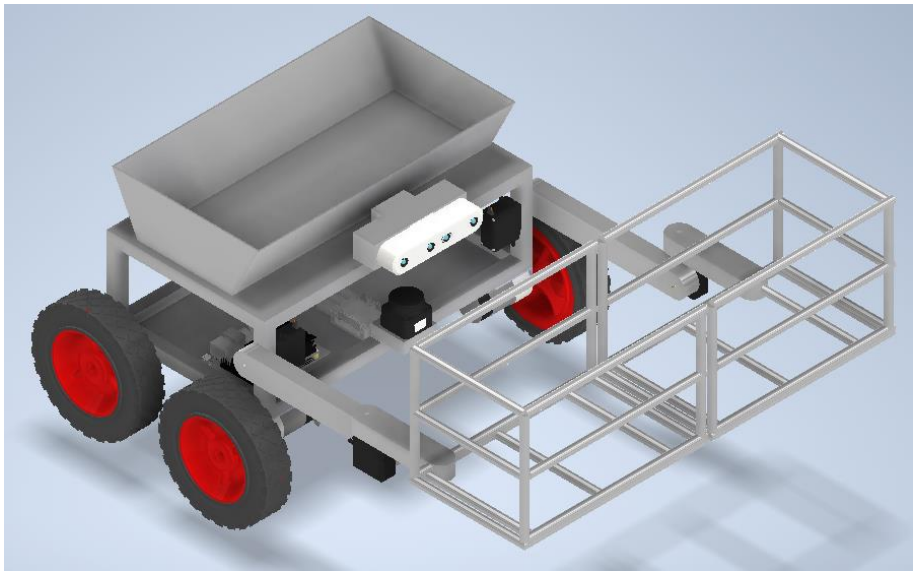


Figura 5. Robot ensamblado.

Fue necesario realizar algunas simulaciones para la validación del diseño realizado, las cuales fueron llevadas a cabo en Autodesk Inventor, comenzando con una simulación de esfuerzos para la validación de los cálculos realizados para los brazos de recolección mediante un análisis de estrés, empleando la teoría de esfuerzo de von Mises. Este análisis se realiza con la finalidad de comprobar que los cálculos realizados en el análisis de fluencia son correctos. El estudio fue realizado a la pieza del brazo del sistema de recolección del robot, considerando las fuerzas ejercidas por el peso del mismo sistema de recolección y el peso de las botellas una vez recolectadas.

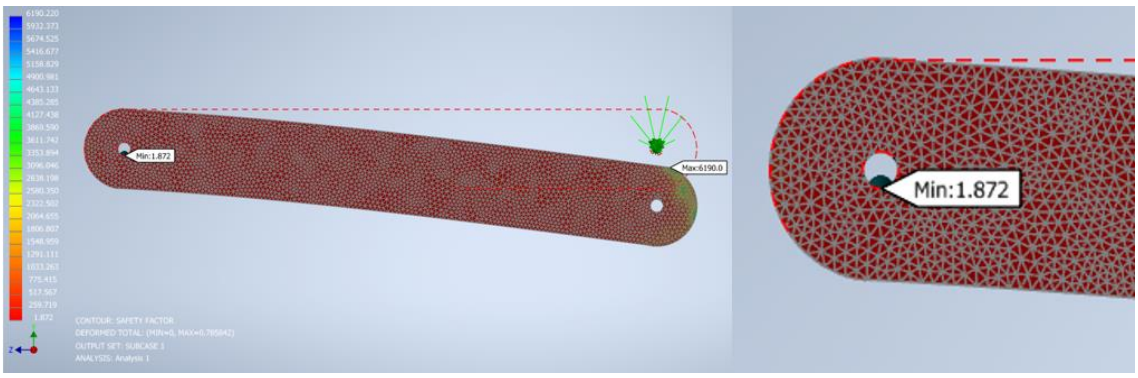


Figura 6. Simulación de esfuerzos.

Como se muestra (Figura 6), el estudio arroja como resultado un factor de seguridad de 1.872, lo cual indica que los valores de largo y espesor de los brazos cumple con su objetivo, permitiendo al robot realizar sus operaciones de forma óptima, sin riesgo de falla.

En seguida se realizó un análisis modal con el objetivo de encontrar las frecuencias de vibraciones que se deben evitar al momento de poner en operación el prototipo, al ejecutar el análisis, se obtiene la gráfica de frecuencia contra modal (Figura 7).

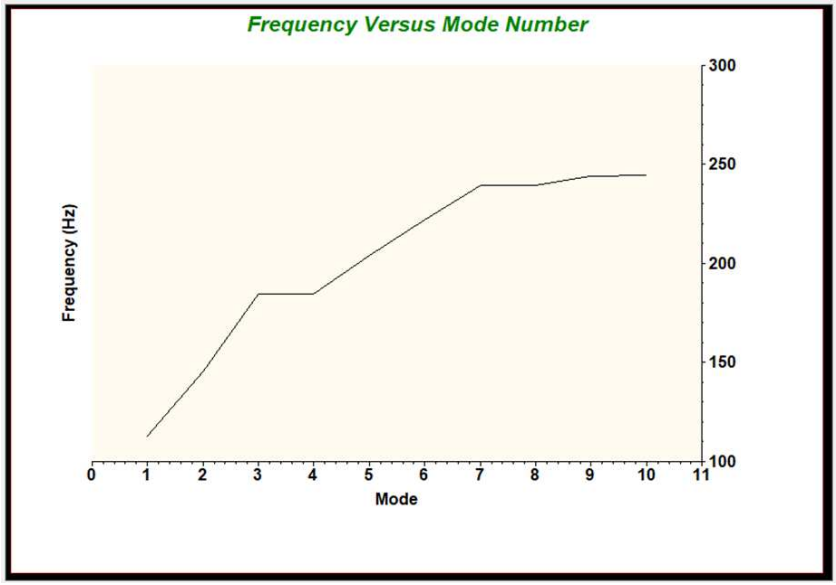


Figura 7. Gráfica de frecuencia contra modal.

A continuación, se especifica la frecuencia exacta para cada número de modal, según los resultados dados por el análisis.

Tabla 3. Frecuencias contra modal.

No. De modo	Frecuencia (Hz)	Velocidad angular (rpm)
1	112.736	6764.16
2	145.327	8719.62
3	184.615	11076.90
4	203.891	12233.82
5	221.847	13310.82
6	239.417	14365.02
7	244.165	14649.90

Con los resultados obtenidos y mostrados en la Tabla 3 se logra entender que las velocidades obtenidas en este análisis modal no representan un riesgo de funcionamiento, ya que son valores bastante alejados de los valores calculados.

Por último, se realizó un análisis de pandeo tiene el objetivo de estimar la carga máxima que podrá soportar la estructura del prototipo sin que se presente ninguna deformación. Para ello se realizó el análisis en el chasís del robot, específicamente en la parte donde se apoyarán las ruedas, considerando las fuerzas que ejercerá el mismo peso de las diversas estructuras del prototipo y la fuerza que ejerce la gravedad. Primeramente, se realizó el cálculo de la fuerza total (*Ftot*) que se ejercerá. Para ello, se sumó el peso estimado del prototipo (dado por el software) más el peso aproximado del total de botellas que recolectará el robot y se multiplicó por la gravedad. Esta fuerza se dividió entre 4, ya que el robot se soporta sobre las 4 ruedas que lo componen (*F*).

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 5, pp. 47 - 58.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

$$F_{tot} = m \cdot g \tag{16}$$

$$F_{tot} = (7.650\ kg)\left(9.810\ \frac{m}{s}\right) = 75.046\ N$$

$$F = \frac{F_{tot}}{4} \tag{17}$$

$$F = \frac{75.046\ N}{4} = 18.761\ N$$

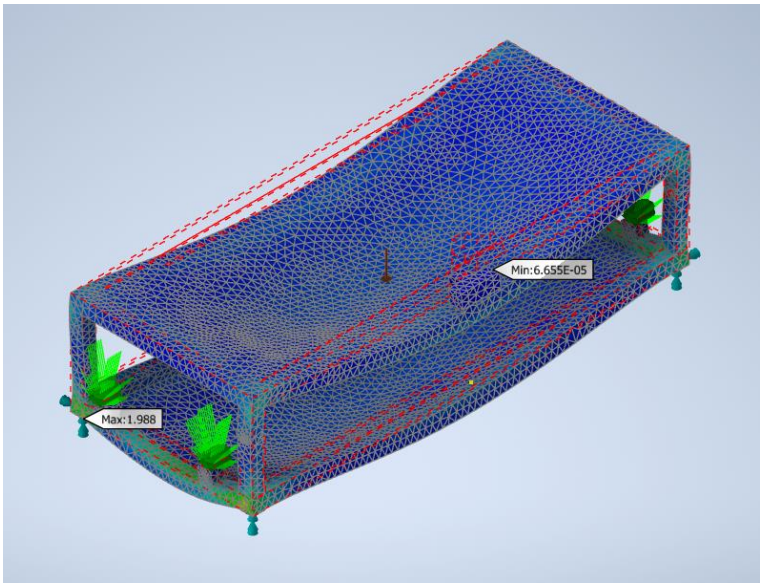


Figura 8. Análisis de pandeo.

Finalmente, el análisis arroja un eigenvalor de *1092.007* (Figura 8), lo cual significa que se le debe aplicar una fuerza equivalente a *1092,007·Ftot* para poder pandear el elemento.

4. Conclusiones

Se realizaron los respectivos cálculos, diagramas e investigación necesaria para el diseño electrónico y mecánico para que el robot autónomo sea capaz de su movilidad a través de un terreno arenoso, tomando en cuenta que el peso estimado es de 10 kg, así como de la capacidad de recolección y almacenamiento de envases, el cual corresponde a un volumen de 3000 cm^3, con un suministro de energía que permitiera un periodo de trabajo mínimo de 20 minutos.

Considerando las condiciones de este tipo de terreno se definió un sistema de locomoción de configuración diferencial, que permita una velocidad máxima de desplazamiento de 0.3 m/s, adicionalmente se diseñó una estructura de material ligero resistente a la corrosión que además soporte las fuerzas a las que se espera este expuesta y no supere las medidas establecidas en los objetivos del trabajo. Para esto se realizaron análisis de estudio mecánicos de fluencia, pandeo y modal.

Se estructuró un sistema electrónico que considere la teoría de fusión de sensores para lograr la autonomía del robot, así como el cálculo del consumo energético que representará este sistema para permitir el tiempo de operación mínimo previamente establecido. Con estos datos se permitió la selección de componentes como sensores, actuadores y tarjetas de control con los que se estima el funcionamiento adecuado del sistema.

En futuros desarrollos, se plantea la construcción del diseño, con el objetivo de evaluar algoritmos para la conducción autónoma del robot en el entorno de trabajo. Esto permitirá la evasión de obstáculos, así como de peatones presentes en el área, sin dejar de lado la detección de los envases, realizado mediante la implementación de los sensores previamente mencionados, los cuales serán fundamentales para llevar a cabo las actividades de autonomía. Además, se llevará a cabo una evaluación mediante pruebas para asegurar que el sistema de recolección propuesto tiene un funcionamiento optimo.

Referencias

[1] P. Pérez-Sanchez, *“Contaminación por plásticos en el mar Mediterráneo: aproximación cuantitativa y modelización para la comparación de estrategias de futuro,”* pp. 1–37, 2020. [Online]. Available: https://riunet.upv. es/handle/10251/158906.

[2] P. Flores-Arévalo, *“La problemática del consumo de plásticos durante la pandemia de la covid-19,”* South Sustainability, vol. 1, pp. 1–6, 2020.

[3] R. I. d. I. M. y. C. Elías*, “Mar del plástico: Una revisión del plástico en el mar,”* Rev. Invest. Desarr. Pesq., vol. 105, pp. 83–105, 2015. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/1834/10964.

[4] R. G. Budynas, “*Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*,” 9ª ed. México: Mc Graw Hill, 2012.

[5] O. E. Piro, *“Notas sobre Física General: Resistencia a la rodadura,”* pp. 1–4, 2014.

[6] J. R. Figueroa, W. M. Montalvo, and M. M. Bayas, *“Cinemática y Dinámica de Robots Moviles con Ruedas,”* iladi ed., A. Poveda G., Ed., Latinoamérica, 2023, vol. 4, no. 1.

[7] R. Fernández, R. Aracil, and M. Armada, *“Control de tracción en robots móviles con ruedas,”* RIAI-Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, vol. 9, no. 4, pp. 393–405, 2012.

[8] K. De La Torre and J. Yufra, *“Diseño de un robot móvil recolector y compactador de botellas de plástico utilizando redes neuronales en playas con arena fina,”* Universidad Ricardo Palma, pp. 1–134, 2020. [Online]. Available: http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/3529

[9] D. Vázquez-Lucero, J. E. Luna-Taylor, I. M. Santillán-Méndez, and C. Higuera-Verdugo, *“Robot móvil autónomo con reconocimiento y navegación hacia botellas de plástico,”* Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI, vol. 10, no. Especial4, pp. 100–109, 2022.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 6, pp. 59 - 77.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Diseño de Dispositivo para Prevención del Síndrome de Muerte Súbita del Lactante Aplicando la Metodología de Diseño Mecatrónico

Ana Jazive Flores Duarte, Fernando Jassiel Castañón Hernández, Ramón Jaramillo Martínez, Jorge Talavera Otero, Umanel Azazael Hernández González y Flabio Dario Mirelez Delgado

Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas (UPIIZ-IPN)
Ingeniería Mecatrónica, Zacatecas, Zac., México
fmirelezd@ipn.mx

Resumen

En el ámbito de pediatría y salud publica el síndrome de muerte súbita del lactante (SIDS) ha sido un tema de interés en las últimas décadas; a pesar de los avances tecnológicos y educación impartida a padres en materia de salud, aun es común que este problema se presente en gran medida en la sociedad actual, siendo esta la primera causa de muerte pos-neonatal. El SIDS continúa siendo un tema de gran importancia y un área de investigación en el área de salud infantil específicamente en niños menores a un año. Esto origina la necesidad de un sistema para el monitoreo constante portátil e inalámbrico, de los signos vitales del lactante, como la frecuencia cardíaca y temperatura; además de su posición al dormir mediante el uso de un giroscopio. En el presente documento se realizó el diseño de un sistema monitoreo que cuenta con un monitor en el cual se podrán observar los signos vitales antes mencionados el cual avisa a los padres en caso de que estos valores presenten niveles alarmantes. El dispositivo está planteado para poder despertar al lactante con pequeñas vibraciones, en caso de presentar datos anormales en los signos vitales. Contará con una interfaz humano-máquina para que el usuario pueda configurar los datos del lactante y del cuidador, y monitorear sus signos vitales.

Palabras clave: Síndrome de muerte súbita del lactante, dispositivo inalámbrico, signos vitales, monitoreo portátil.

1. Introducción

El Síndrome de Muerte Súbita del Lactante (SIDS por sus siglas en ingles), constituye la primera causa de muerte pos neonatal, y en países como Estados Unidos o Alemania supone casi el 50% de dicha mortandad. Para el trienio del 2015-2017 la tasa de nacimientos fue de 70.7 % por cada mil embarazos de los cuales la muerte súbita de cuna representa alrededor de 250 muertes al año de lo que supone un problema para los padres y la sociedad en general [9, 5], Por otra parte, para el 2019 en México la estadística refleja que fallecieron 13 niños de cada 1000 nacimientos, todos menores de un año, el total de nacimientos de ese año fue de 2 millones [7, 4]. En los años 90 la tasa de SIDS tuvo una disminución del 90 % dado que la sociedad de pediatría implementó medidas sobre el sueño seguro en niños, algunas de estas recomendaciones fueron acostar al bebé boca arriba, evitar colocar elementos sueltos en la cuna y no abrigar demasiado al bebé [10].

La distinción entre SIDS y otras muertes súbitas e inesperadas en infantes, radica principalmente que éstas ocurren durante un período de sueño no observado (muertes infantiles relacionadas con el sueño), como la sofocación involuntaria que es un problema desafiante que puede ser prevenido [13].

En la actualidad los padres optan por dispositivos de monitoreo tradicionales para los bebés, como lo son los monitores de audio y video colocados en las habitaciones, cerca de la cuna o la cama. Esto se debe a que los dispositivos inteligentes para monitoreo constante suelen tener precios elevados de alrededor de 20,000 MXN - 40,000 MXN [10].

El actual diseño plantea una vía de prevención, ya que se puede estar monitoreando en conjunto la posición y los signos vitales del lactante visualizando la información en un display inalámbrico portátil, asimismo se propone una disminución de costos en comparación a los dispositivos existentes en el mercado. El presente proyecto pretende reducir la incidencia del SIDS a través de un dispositivo que monitorea los datos del lactante y los envía de forma inalámbrica para su presentación en un monitor. Al monitorear los datos también analiza que los valores estén dentro de los estándares dados por la comunidad médica, en caso de que se presenten niveles alarmantes el dispositivo dará una alerta en el monitor, además de enviar un mensaje de texto al cuidador o padres, avisando del signo vital y su valor que esté fuera de lo normal.

2. Metodología

Se diseñó un dispositivo inalámbrico y portátil, mediante el cual se monitorearán en tiempo real los signos vitales del lactante, los cuales son, frecuencia cardíaca y temperatura, así como la posición, esto por medio de sensores. Los datos serán enviados al monitor de signos vitales empleando tecnología de radiofrecuencia, que, en conjunto con la posición del bebé, podrán ser visualizados en dicho monitor en todo momento, en caso de presentar alteraciones en los signos del lactante el dispositivo producirá un estímulo al bebé por medio de vibraciones, al mismo tiempo se dará una alerta en el monitor y en el teléfono móvil de los padres o cuidador.

La Figura 1 muestra el diagrama del proceso, comenzando con la obtención de datos por medio del dispositivo, después se procesarán para convertirlos en datos que se puedan enviar, posteriormente éstos serán analizados para saber si se encuentran dentro de los rangos normales, en caso contrario se enviará la alerta al dispositivo.

El funcionamiento deseado se representa por medio del diagrama A0 de la herramienta gráfica de modelamiento IDEF-0, el cual se muestra en la Figura 2.

2.1. Diseños Conceptuales

Partiendo del funcionamiento deseado propuesto en la sección anterior, se puede listar las necesidades del sistema que ayudaran a generar 3 diseños conceptuales. El sistema debe de cumplir con lo siguiente:

- El sistema debe ser capaz de medir la temperatura del lactante.
- El sistema debe ser capaz de medir la frecuencia cardíaca del lactante.
- El sistema debe ser funcional para evitar lesiones o problemas para el lactante.
- El sistema debe ser capaz de brindar información acerca de la posición del lactante.
- El sistema debe ser capaz de alertar a los cuidadores del lactante.
- La interfaz debe mostrar de forma eficiente los signos vitales del lactante en todo momento.
- El sistema debe ser de costo accesible.
- El sistema debe tener un tiempo adecuado de respuesta entre los sensores y el monitor.
- El sistema debe tener una durabilidad de batería adecuada.

Con las necesidades listadas anteriormente, se generaron los diseños conceptuales que se muestran en la Figura 3, de donde se elegirá el que cumpla de manera más eficiente con las necesidades listadas anteriormente. A continuación, se describe cada diseño conceptual con sus características más relevantes:

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 6, pp. 59 - 77.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

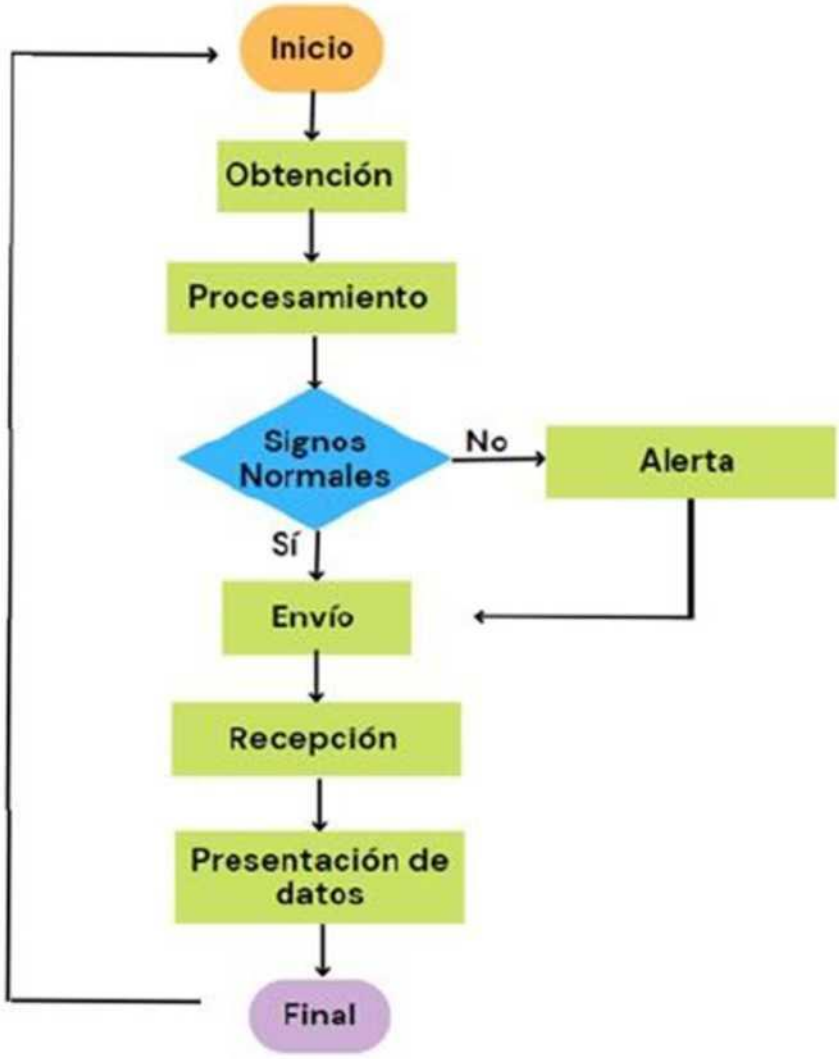


Figura 1: Diagrama de descripción del proceso.

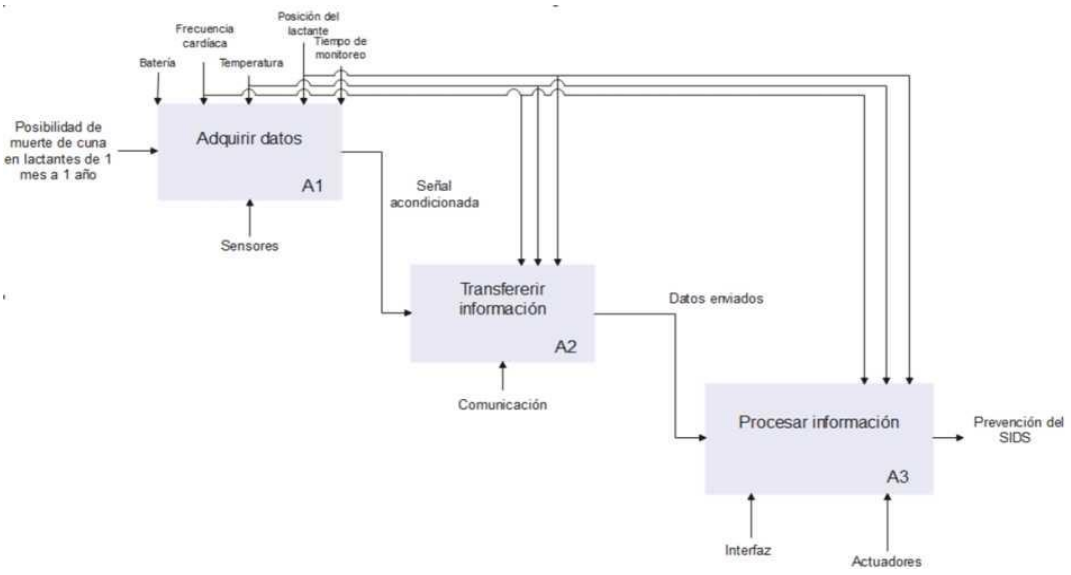


Figura 2: Diagrama IDEF-0 A0.

Diseño conceptual 1: Para generar el diseño conceptual mostrado en la Figura 3a se tomó en cuenta lo siguiente:

- Microcontrolador.
- Pantalla de 10” LCD navegación por botones.
- Carcasa de lamina.
- Envió de alerta a cuidadores SMS.
- Baterías.

Para el dispositivo de recolección de señales (DRS):

- Pechera.
- Comunicación bluetooth.
- Microcontrolador.
- Motor vibrador.
- Sensores MXL90614 y ARD-366.
- Batería recargable.

Diseño conceptual 2: De misma forma para el diseño conceptual de la Figura 3b se consideraron las siguientes características:

- Raspberry.
- Pantalla 7” táctil.
- Carcasa impresa en 3D.

(a) Diseño conceptual 1

(b) Diseño conceptual 2

(c) Diseño conceptual 3

Figura 3: Diseños conceptuales del dispositivo para prevención del síndrome de muerte súbita del lactante.

- Recargable.
- Envío de alerta a cuidadores SMS.

Para el DRS:

- Manga
- Microcontrolador.
- Comunicación Zigbe.
- Motor vibrador.
- Sensores MXL90614 (Temperatura) y HR0214 (Pulso Cardiaco).

Diseño conceptual 3: Para la formulación del diseño conceptual de la Figura 3c se contempló lo siguiente:

- Microcontrolador.
- Pantalla 5” navegación por botones.
- Carcasa de plástico.
- Baterías.
- Envío de alerta a cuidadores SMS.

Para el DRS:

- Banda de pecho.
- Microcontrolador.
- Comunicación WI-FI.
- Motor vibrador.
- Sensores ADB232 y DHT11 respectivamente.
- Baterías.

Después de hacer un análisis comparativo de los tres diseños conceptuales propuestos, se determinó que el diseño conceptual 2 es el más adecuado.

3. Resultados

Una vez seleccionado el diseño conceptual 2 se procede a la elección de componentes electrónicos que cumplan de manera conveniente con las propiedades de funcionamiento del prototipo.

Controlador del dispositivo general: Se seleccionó una Raspberry Zero (Figura 4), por ser un ordenador de placa única, de tamaño compacto y tener un procesador ARM, que dadas las necesidades del proyecto encaja en los diseños al ocupar un espacio reducido y contar con buena capacidad de procesamiento [3, 14].

Pantalla: Se utilizará una pantalla táctil LCD de 7” (Figura 5) para la visualización de los datos en tiempo real, considerando que es un tamaño adecuado. Su característica táctil permite la reducción de componentes mecánicos como botones o pulsadores.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 6, pp. 59 - 77.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Figura 4: Raspberry Pi Zero.

Figura 5: Pantalla táctil LCD 7".

Microcontrolador para el DRS: El microcontrolador Atmega 328P es un microcontrolador de la familia AVR que es conocido por ser eficiente y tener una buena capacidad de procesamiento, además al tener un procesador de 8 bits se obtienen recursos moderados lo que lo vuelve una opción en aplicaciones embebidas valorando la eficiencia de energía [12, 11]. A diferencia de otras tarjetas de desarrollo comunes como Arduino, el uso de un microcontrolador específico permite diseñar una tarjeta electrónica dedicada exclusivamente a este sistema. Esto garantiza el uso solo de los periféricos y recursos esenciales, lo que contribuye a la portabilidad del sistema y reduce significativamente el espacio requerido en la carcasa.

Sensor de Temperatura MXL90614: El sensor de temperatura mostrado en la Figura 6, es un sensor infrarrojo de distancia que permite tomar lecturas claras de temperatura sin necesidad de tener contacto con la superficie [1, 8], dado que el sistema no debe ser invasivo hacia el lactante.

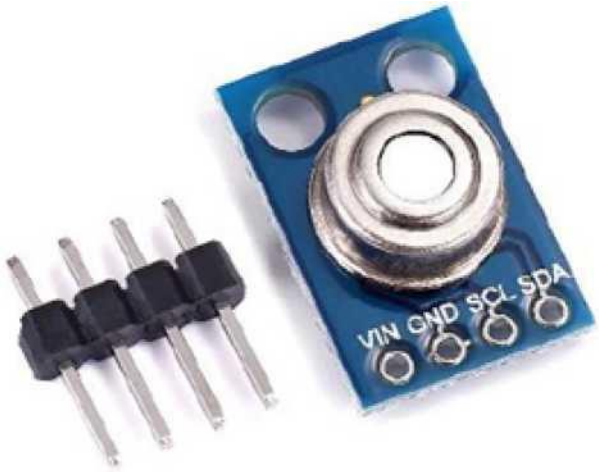


Figura 6: Sensor de temperatura MXL90614.

Sensor de Pulso Cardiaco ARD-366: Para medir la temperatura del bebé se seleccionó un sensor de pulso cardíaco ARD-366 (Figura 7), el cual está diseñado para medir la frecuencia cardíaca en tiempo real con un diseño que permite colocarse en espacios reducidos para enviar los datos de manera correcta es indispensable el contacto con la piel [6, 2].

Figura 7: Sensor de pulso cardíaco ARD-366.

Giroscopio MPU6050: Es un dispositivo microelectromecánico que a través de un giroscopio y un acelerómetro de 3 ejes permite procesar movimientos y velocidades, en el contexto de este proyecto su aplicación es necesaria para conocer la posición del bebé mientras duerme.

Motor Vibrador: Para activar las alertas del dispositivo se usará un motor vibrador de tamaño reducido y de bajo consumo, que puede ser controlado de manera sencilla desde un microcontrolador sin necesidad de controladores adicionales por lo que resulta ser la mejor opción para el espacio reducido del DRS.

Comunicación entre dispositivos: Para la comunicación entre el monitor y el DRS se empleará un módulo XBee ya que ofrecen comunicación inalámbrica robusta y confiable con un bajo consumo energético.

Envío de SMS: Para la comunicación SMS en los teléfonos de los padres se seleccionó el módulo GSM SIM 900L que es capaz de enviar mensajes de texto SMS a un número de teléfono programado, además de tener la capacidad de enviar cadenas de caracteres programadas, por lo que resulta la solución adecuada para la necesidad de enviar una alerta de forma remota.

Fuente de energía: Se usará una batería de Litio de 2000 mAh a 3.7 V para alimentar los componentes sin exceder el voltaje requerido por cada uno, esto con la finalidad de optimizar tiempo y costo. Esta batería permitirá el uso del dispositivo durante 9 horas aproximadamente.

3.1. Diseño de circuito

El diseño eléctrico toma en cuenta protecciones como un transistor MOSFET en la entrada del módulo de carga para evitar una errónea conexión de las baterías, esto en ambos diseños; monitor y DRS. También considera reguladores de voltaje para evitar mediciones erróneas y siempre aplicar el mismo nivel de voltaje y corriente en cada uno de los componentes de la placa.

Para el DRS se diseñó el siguiente diagrama de conexiones eléctricas en la placa de circuito impreso como se muestra en la Figura 8.

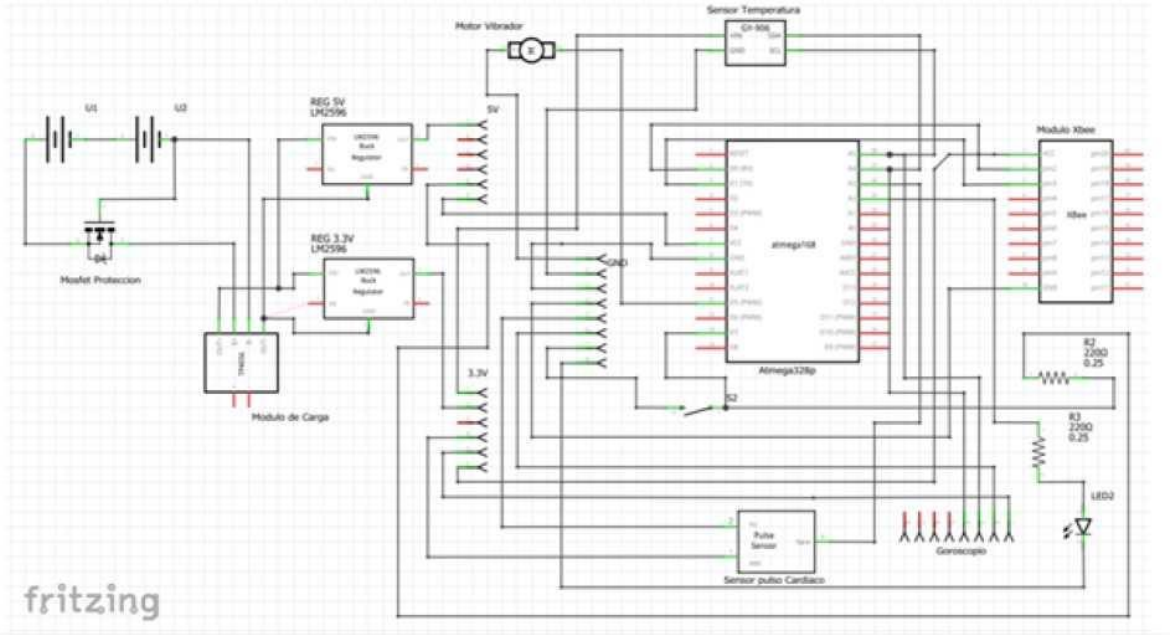


Figura 8: Esquemático de conexiones DRS.

Con ayuda de editores de circuitos se diseñó la placa de circuito impreso (PCB), en ésta se encuentran las conexiones del DRS, tal como se muestra en la Figura 9.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 6, pp. 59 - 77.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

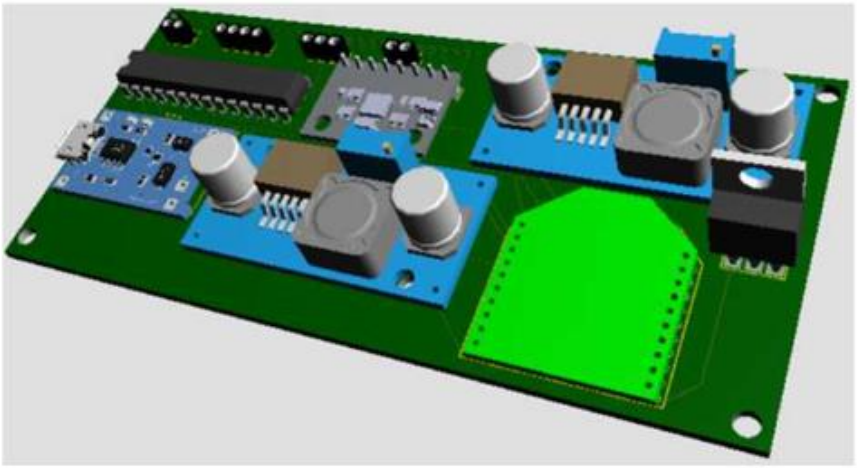


Figura 9: PCB 3D DRS.

El diseño del monitor (Figura 10) también se realizó con base en el diseño conceptual elegido, por lo que se pueden observar la Raspberry Zero, el módulo GSM, los reguladores de voltaje y el dispositivo de comunicación XBee.

Por otra parte, el diseño 3D de la placa de circuito impreso (Figura 11) toma en cuenta la antena del módulo GSM y cada una de las entradas de la placa Raspberry Zero, también considera la orientación de cada módulo para proyectar esas salidas en la carcasa de protección, es por ello que la Raspberry y el módulo de carga no están orientados hacia el mismo sitio.

3.2. Diseño de carcasa

Para el diseño mecánico se tomó en cuenta que deben existir dos carcasas que le proporcionen una protección a los componentes utilizados, por lo que se elaboró un diseño de carcasa para el DRS, el cual será colocado en la manga del lactante, por otra parte, se diseñó la carcasa del monitor que cuenta con propiedades de diseño óptimas para el uso en el hogar.

Se diseñó la carcasa del DRS con un respiradero para disminuir el sobrecalentamiento de los componentes, de igual manera cuenta con un orificio que conecta directamente el USB C de carga, la rejilla de salida de aire y los orificios de conexión a los sensores. Finalmente se diseñó una curvatura realizada para que este dispositivo se acomode a la forma del pecho del lactante y así no molestar mientras se usa. En la Figura 12 se muestra la carcasa.

Dado que se busca que el dispositivo sea portable, se realizaron estudios de caída a las piezas que conforman la carcasa y así observar la deformidad generada en respuesta al impacto. El material utilizado de las librerías de materiales disponibles en SolidWorks® fue plástico ABS, material comunmente utilizado en procesos de fabricación aditiva debido a su alta resistencia [10]. El ABS es isotrópico elástico lineal, donde sus propiedades no varían con la dirección, logrando ser moldeable y de buen funcionamiento para las piezas de la carcasa.

Para validar el diseño del DRS se realizaron simulaciones pensando en el uso que éste tendrá, en este caso, la posibilidad es que el lactante pudiera acostarse sobre él. Por lo anterior, es necesario saber si el diseño soportará presiones, se romperá la estructura o existirá contacto con los componentes electrónicos por la flexión de la carcasa. En la simulación de la Figura 13 se muestra el factor de seguridad bajo las condiciones en que la parte de la base es fija al pecho del bebé y la presión es ejercida por su peso, en este caso se suponen 6 Kg, se simula en la parte de la tapa obteniendo así un factor de seguridad de 16, lo que indica que el diseño soportará correctamente el peso aplicado.

Además del factor de seguridad se realizó una simulación de deformación (Figura 14) con el fin de validar que la estructura soportará un peso y esta no se quebrará, las configuraciones de la simulación son las mismas que para el factor de seguridad, obteniendo una máxima deformación de 6.89e-4 mm lo que no supone ningún riesgo considerable en la estructura

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 6, pp. 59 - 77.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

.

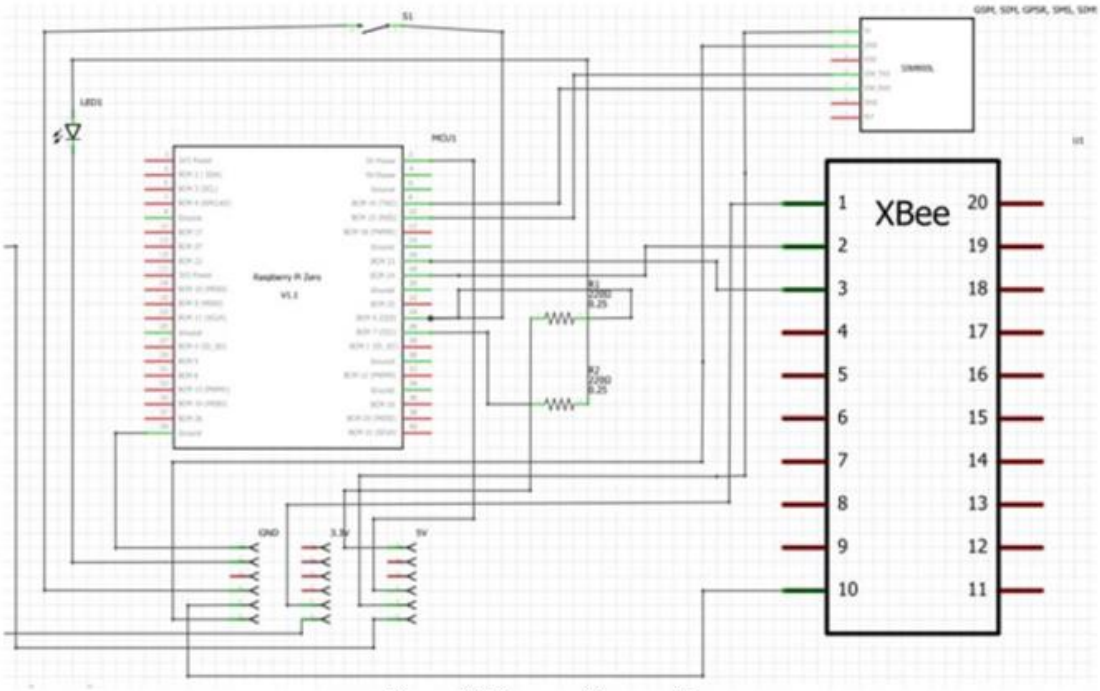


Figura 10: Esquemático monitor.

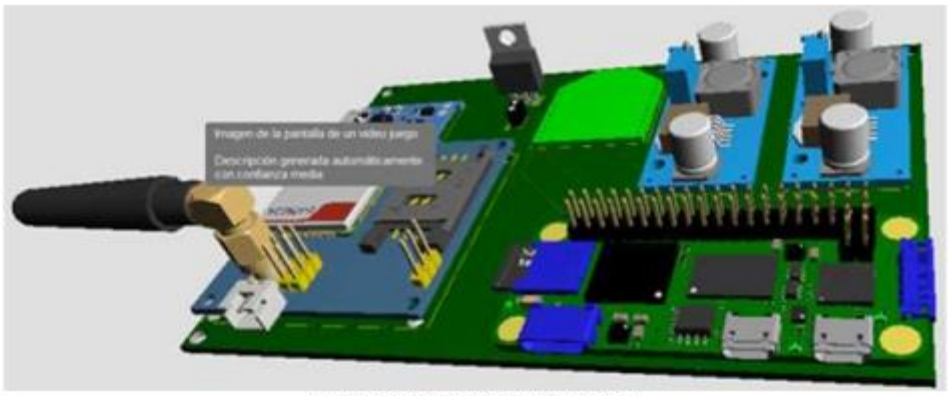


Figura 11: PCB 3D monitor.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 6, pp. 59 - 77.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Figura 12: Carcasa de DRS.

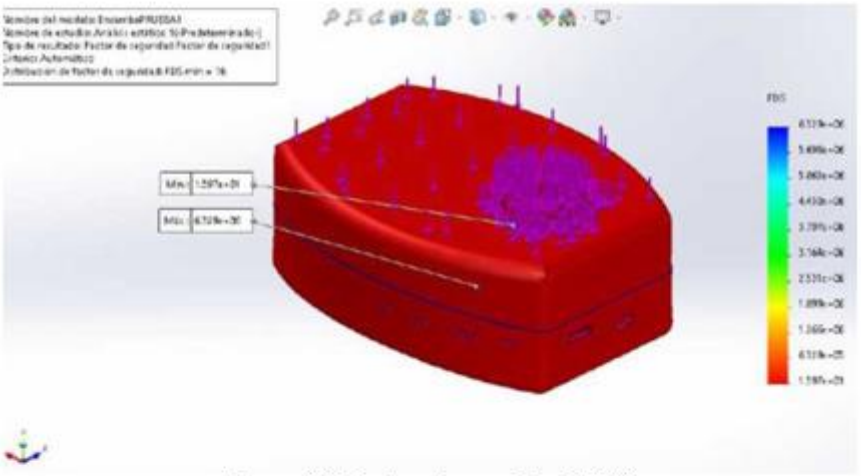


Figura 13: Factor de seguridad DRS.

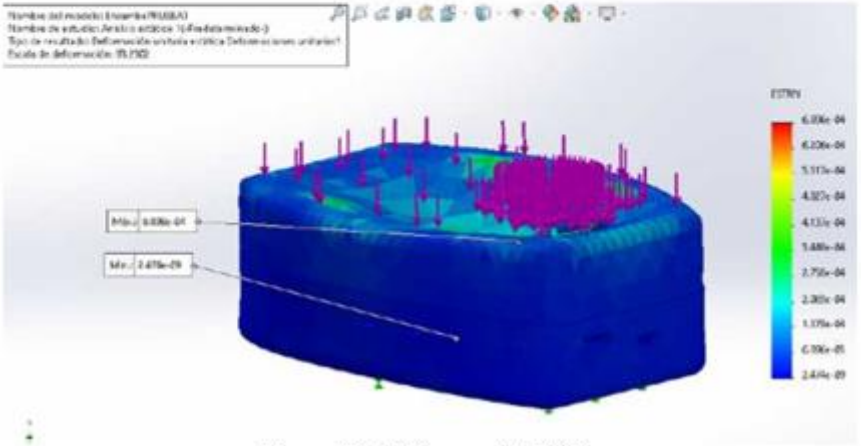


Figura 14: Deformación DRS.

El DRS contiene la placa de circuito impreso con sus respectivos componentes, dadas sus características es necesario considerar el calentamiento de estos, por lo que se realizó una simulación de flujo de aire para comprobar su correcta ventilación dentro del gabinete, mostrado en la Figura 15.

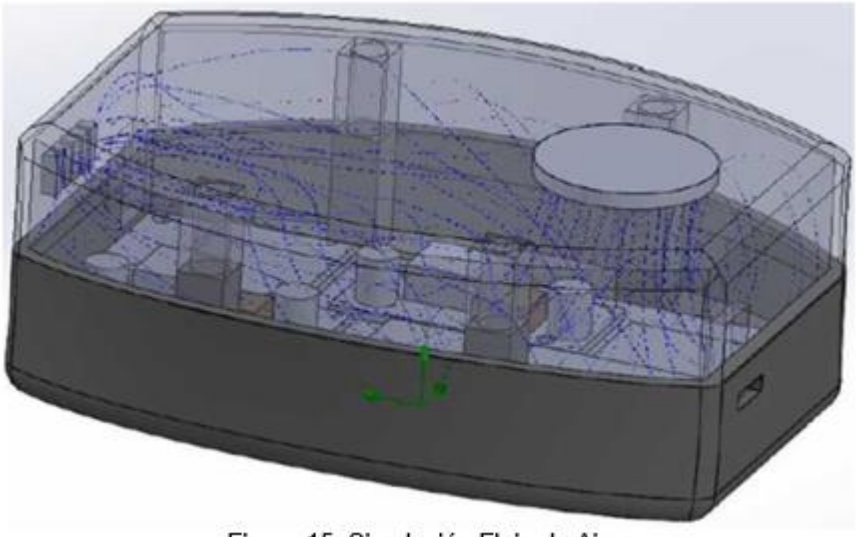


Figura 15: Simulación Flujo de Aire.

Para el monitor se realizó el diseño de una carcasa (Figura 16) que cuenta con un cierre con broches. En la carcasa se observan 4 cuerdas para tornillos en la parte frontal que se encargaran de asegurar la pantalla de 7 pulgadas, también se diseñó un soporte superior para colgarse o recargarse y obtener una mayor comodidad cuando se esté usando. Así mismo, se pueden observar los orificios para la antena del módulo SMS que sobresale de la carcasa, así como, los orificios de carga, y conexiones HDMI para pruebas.

Dado que las condiciones de la carcasa de la pantalla no serán de presiones, ni tampoco recibirá cargas excesivas, se realizó una simulación de caída ya que estará susceptible a accidentes, por lo que es necesario saber si el material y la estructura diseñada soportarán.

A continuación, en la Figura 17 se observa el resultado de tensión en la simulación de caída, donde se puede observar que la máxima tensión recibida será en la parte del respiradero, lugar donde se encuentra la estructura más frágil, con un valor de $2.5e7\ Nm^2$.

Se realizo el calculo del factor de seguridad a partir del límite elástico del material y el máximo esfuerzo donde se soporta una caída de 3 metros.

3.3. Diseño de soporte para DRS (Manga)

Dadas las condiciones del actual proyecto es necesario diseñar un soporte que mantenga al DRS en el pecho del lactante, y que también proporcione una plataforma de soporte para los sensores que se ubicaran en diferentes partes de la misa. Aprovechando la forma de una hombrera, el sensor de temperatura se ubicará en la parte debajo de la axila del lactante, el sensor de pulso cardiaco se ubicará en la parte interna del antebrazo, y por último el giroscopio estará dentro del DRS, mismo que estará encapsulado en la hombrera, en la parte del pecho, de la misma forma lo estarán los sensores en sus respectivos lugares como se muestra en la Figura 18.

Por otra parte, se debe tomar en cuenta que el diseño de la manga no debe ser rígido y además debe tener condiciones elásticas, de resistencia, e impermeabilidad se usara neopreno. El diseño de la hombrera será lo más parecido a lo existente en el mercado actual, dado que sus características nos permiten la ubicación de los sensores además de una plataforma cómoda y menos invasiva para el lactante. Las medidas de la manga se muestran en la Figura 19.

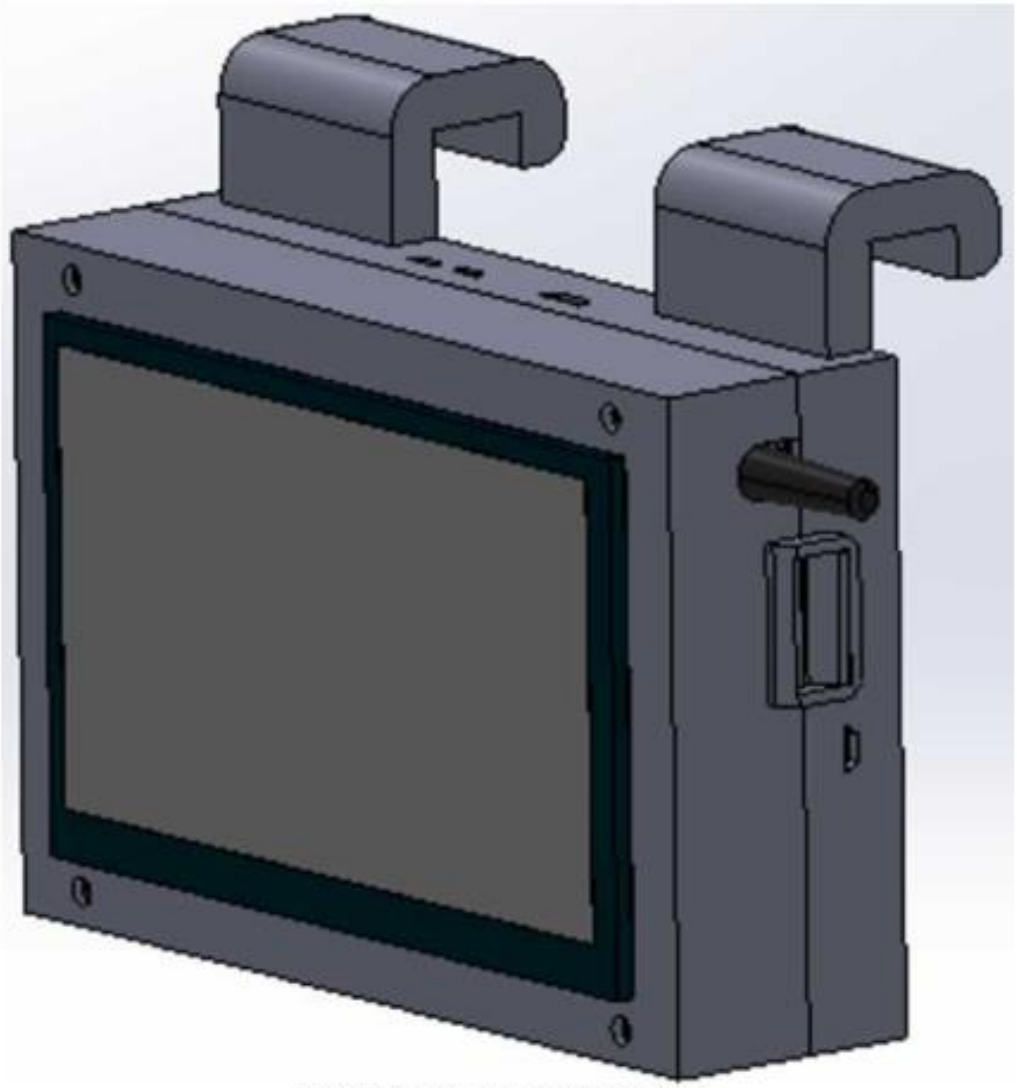


Figura 16: Carcasa de pantalla.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 6, pp. 59 - 77.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

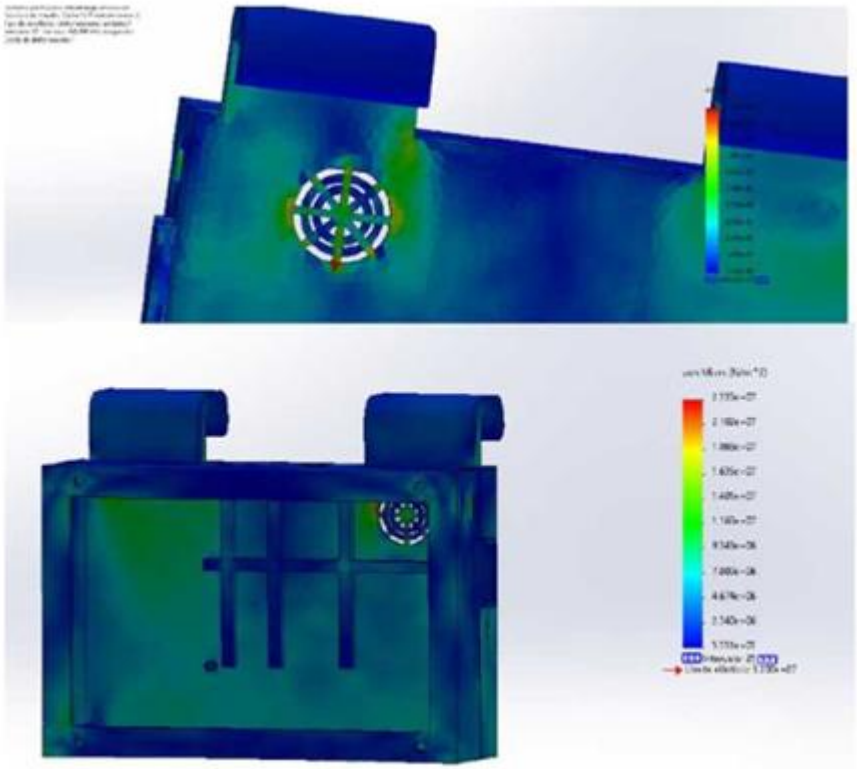


Figura 17: Simulación de tensiones.

Figura 18: Posicionamiento de sensores.

Figura 19: Diseño de manga con medidas estándar de lactante.

3.4. Diseño de interfaz

La Interfaz Humano-Máquina (HMI) se encargará principalmente del monitoreo del sistema y se podrán tomar decisiones por medio de ella. El diagrama de funcionamiento de la Interfaz es el que se observa en la Figura 20.

Con base en el diagrama de flujo y los periféricos se diseñaron las pantallas que utilizarán en la HMI y las advertencias necesarias para el sistema. Contará con 4 menús principales:

Inicio: Donde se mostrará el inicio de sesión del usuario.

Monitor: Donde se muestran los valores de frecuencia cardíaca, temperatura y posición del lactante.

Datos: Donde se ingresan los datos del lactante y del cuidador.

Historial: Donde se guardará el historial de los datos de los signos vitales de días anteriores.

En la Figura 21 se muestran las diferentes pantallas propuestas del sistema.

4. Conclusiones

En el presente trabajo, los diseños de las piezas del proyecto se desarrollaron de forma que puedan cumplir los requerimientos planteados. La principal dificultad que se presentó es dentro del diseño del gabinete para los componentes que irán dentro de la manga que portará el lactante, puesto que ésta debía tener un diseño cómodo y adecuado para no lastimar al bebé y además que éste no limitara la movilidad del infante.

La selección del material para la manufactura de los distintos diseños se eligió con base en evaluaciones mecánicas del material y los métodos de manufactura disponibles. De igual manera, se seleccionaron los distintos componentes de electrónica considerando los requerimientos planteados, presentando mayor dificultad en la selección de sensores que obtengan valores precisos de los signos vitales del lactante los cuales se seleccionaron con base en su tamaño y funcionalidades. La intercomunicación entre módulos se resolvió al optar por un microcontrolador ubicado en la manga del lactante para emisión de los valores de los signos vitales y una Raspberry Pi Zero ubicada en la placa del monitor para recepción de los datos, utilizando la tecnología XBee debido a que ésta cumplía con las necesidades del proyecto.

Se planteó el diseño de una interfaz capaz de implementar el monitoreo de temperatura, frecuencia cardíaca y posición a través de una serie de pantallas con las que interactuará el usuario. Por otra parte, la programación en conjunto con los sensores y el actuador presentes en el actual proyecto serán capaces de crear un sistema de control acorde con los signos vitales del lactante, el sistema podrá enviar estímulos y alarmas en caso de emergencia.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 6, pp. 59 - 77.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

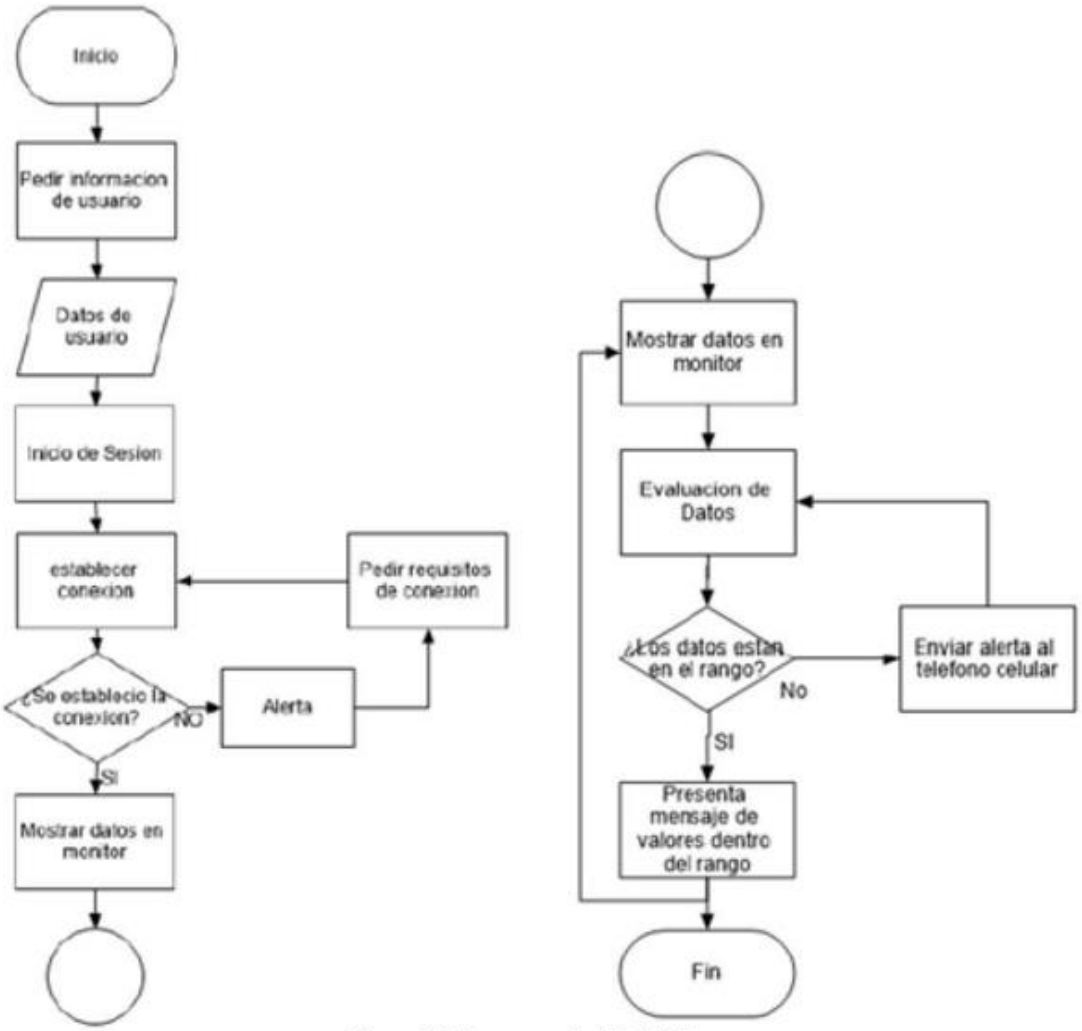
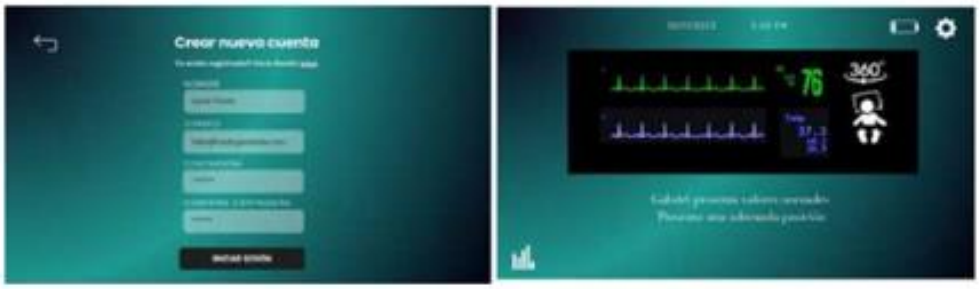


Figura 20: Diagrama de flujo HMI.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 6, pp. 59 - 77.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

(a) Diseño de pantallas HMI (Inicio de sesión)



(b) Diseño de Pantallas HMI (Creación de cuenta y Visualización de valores de los signos vitales)

(c) Diseño de Pantallas HMI (Ajustes de Información e Historial de valores del lactante)

Figura 21: Diseño de pantallas.

Referencias

[1] Adewale, L.M., Aina, T.S., Emmanuel, A., Akinte, O.O.: Smart Digital Thermometer for Covid-19 Detection. International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES) 10(3), 16-20 (2022)

[2] ESPINOSA-ESPINOSA, M.I.: Didactic prototype for the implementation of the STEAM methodo- logy in university electronics courses using the Arduino platform with a constructivist approach to learning. Revista de Tecnología y Educación 6(16), 10-23 (2022)

[3] Gamess, E., Hernandez, S.: Performance Evaluation of Different Raspberry Pi Models for a Broad Spectrum of Interests. International Journal of Advanced Computer Science and Applications 13(2), 819-829 (2022)

[4] Guntheroth, W.G.: Sudden Infant Death Syndrome (Follow-up). eMedicine Pediatrics 93(6), 784793 (2014), http://emedicine.medscape.com/article/1004238-followup

[5] Isela, R.: Redalyc.Síndrome de muerte súbita del lactante. Prevención en la práctica hospitalaria (2006)

[6] Jair, E., Isai, S.:Smart Heart: SISTEMA DE TELEMEDICINA PARA LA MONITORIZACIÓN DE LAS CONSTANTES VITALES SMART HEARTH: TELEMEDICINE SYSTEM FOR VITAL SIGN MONITORING 10, 70-73 (2022)

[7] Lopez-Cervantes, G., Peña-Macedo, A.: El Síndrome de Muerte Súbita del Lactante, en Hermosillo, Sonora, México. Guillermo. Bol Blin Hosp Infant Edo Son 25(2), 78-84 (2008)

[8] Mahfud, M.I., Jariyah, T.A., Abidin, Z., ...: Non-Invasive Telemedicine System for Measuring Blood Sugar Levels. International Journal of . . . (May) (2022), http://amcs-press.com/index.php/ijamib/article/view/322

[9] Mart, M.A., Rodr, R.S.: Muerte súbita del lactante. Qué hacemos y qué debemos hacer para prevenirla. World 27(5), 253-259 (2006)

[10] Ottaviani, G., Matturri, L., Rossi, L., James, T.N.: Crib death: Further support for the concept of fatal cardiac electrical instability as the final common pathway. International Journal of Cardiology 92(1), 17-26 (2003)

[11] Sudhan, R., Kumar, M., Prakash, A., Devi, S.R., P., S.: Arduino Atmega-328 Microcontroller. Ijireeice 3(4), 27-29 (2015)

[12] Tan, Y., Setiaji, A., Wismiana, E., Yunus, M., Effendi, M.R., Munir, A.: IoT System Implementation for ATmega328 Microcontroller Based Home Door Control. Proceeding of 2019 5th International Conference on Wireless and Telematics, ICWT 2019 pp. 31-34 (2019)

[13] Valdés-Dapena, M.: Are some crib deaths sudden cardiac deaths? Journal of the American College of Cardiology 5(6), 113B-117B (1985)

[14] Yamanoor, S., Yamanoor, N.S.: With the raspberry pi (46), 3-7 (2016)

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 7, pp. 78 - 90.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Diseño y Desarrollo de un Prototipo de Cámara de Crecimiento Vegetal

Guerrero Sánchez Jacqueline[1,2], Guerrero Flores José Rosario[1,2], Olvera Olvera Carlos Alberto[1], Solís Sánchez Luis Octavio[2], Martínez Blanco Ma. Del Rosario[2], Guerrero Osuna Héctor Alonso[2], López Martínez Manuel de Jesús[1] y Díaz Flórez Germán[1]

[1]Laboratorio de Invenciones Aplicadas a la Industria-LIAI, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Campus Siglo XXI, Zacatecas 98160, Zacatecas, México.
[2]Posgrados en Ingeniería y Tecnología Aplicada, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas 98000, Zacatecas, México
liai@uaz.edu.mx

Resumen

En el presente trabajo de investigación se diseñó y desarrolló una cámara de crecimiento vegetal destinada al cultivo de plantas madre para la producción de esquejes. El prototipo de la cámara de crecimiento construido e instalado en el Laboratorio de Invenciones Aplicadas a la Industria de la Universidad Autónoma de Zacatecas se enmarca en el sector de aparatos y dispositivos cuya finalidad es la de mantener condiciones ideales para el desarrollo vegetal y asegurar la producción del follaje por un tiempo prolongado, para ello se implementó el uso de un sistema de monitoreo y control basado en la plataforma Arduino UNO, el cual permite monitorear las variables de temperatura y humedad relativa, así mantener dichas variables en un rango ideal con valores establecidos en el interior de la cámara que depende del tipo de planta madre, en este caso práctico, Stevia (Stevia Rebaudiana Bertoni). Este prototipo se encuentra construido con materiales térmicos aislantes para evitar la transferencia e intercambio de calor entre el interior y el exterior del mismo, además, el concepto de la cámara incluye el uso eficiente del agua por lo cual se emplea la técnica de aeroponía.

Palabras clave: Cámara de crecimiento, plantas madre, ambiente controlado, aeroponía, sistema de control.

1. Introducción

La agricultura es una actividad que se ha sabido establecer en la vida cotidiana de las personas, durante el proceso de desarrollo se fue acumulando experiencia y conocimiento, los cuales fueron aplicados en el suelo con el fin de obtener alimentos para abastecerse. Se considera la agricultura como una actividad fundamental para el desarrollo de la humanidad siendo el comienzo de las civilizaciones [1].

La manera de cultivar actualmente ha llevado a la sobreexplotación y degradación del suelo debido a las prácticas agrícolas insostenibles, como estas prácticas se han vuelto intensivas puede contribuir a la erosión del suelo y la perdida de materia orgánica, lo que hace que disminuya la capacidad para retener agua y nutrientes, además de la contaminación que ha sufrido el agua [2].

A medida en que la demanda alimenticia va en aumento se requiere de métodos innovadores para hacer frente de manera sostenible y eficiente, debido a esto se ha generado una creciente presión sobre la agricultura. Con la ayuda de la agricultura interior y la agricultura en ambientes controlados se maneja un enfoque prometedor ante este desafío [3].

Para los cultivos en interior se emplean técnicas sin suelo, utilizando sustratos que pueden absorber agua y soluciones nutritivas. Aunque estos sustratos no aportan los nutrientes necesarios para las plantas, su alta capacidad de absorción optimiza la disponibilidad de nutrientes. Algunas de las técnicas que recurren al uso de sustratos, incluye la hidroponía y las columnas de cultivo [4].

La sobreproducción de plantas mediante una planta madre, vuelve más factible el uso de una sola planta para producir más mediante esquejes, para este tipo de cultivo se requiere mantener un ambiente en el cual pueda estar produciendo follaje durante todo el año sin que se vea afectado por el clima exterior, haciendo uso de cultivos en sistemas cerrado o en ambiente interior [5].

La producción de plantas mediante el enraizamiento es una técnica que permite obtener plantas idénticas a la planta madre, esta técnica se realiza en cámaras que aporten las condiciones ambientales óptimas en interior para su desarrollo, este tipo de condiciones pueden ser controladas, lo cual hace posible producir durante todo el año [6].

Una posible solución es la implementación de tecnología de detección óptica, ambientes controlados y sensores para medición de parámetros en cultivos, como lo son: temperatura, humedad relativa y cantidad de nutrientes. Mediante la utilización de este tipo de tecnologías se puede analizar en los cultivos de plantas los tejidos vegetales, evaluar la calidad, el rendimiento de los cultivos y evaluar el nivel de estrés en las plantas [3].

Con el desarrollo que se ha tenido a lo largo del tiempo se ha generado el uso de distintos elementos automatizados, como lo es la implementación de sensores, drones y maquinaria automatizada, la cual permite tener un control especifico en factores indispensables en los cultivos de plantas, además de que estos tipos de elementos permiten abarcar de manera más eficaz, al momento de revisar las cosechas o cultivos, también se puede monitorear mediante satélites que permiten abarcar aún más área del campo de visión de los cultivo [7].

La aplicación de distintas técnicas de cultivo, como lo es el cultivo interior que es ampliamente utilizado a nivel mundial debido al desarrollo de plantas en un entorno controlado, en el cual se pueden modificar y gestionar artificialmente los elementos necesarios para el crecimiento y desarrollo vegetal controlado, la agricultura inteligente y de precisión es una alternativa que ofrece muchos beneficios para el manejo de recursos y el análisis de tierras dedicadas al cultivo y la producción de alimentos, con el fin de mejorar la sostenibilidad y la capacidad productiva [8].

La planta Stevia (Stevia Rebaudiana Bertoni) trata de una especie Stevia perteneciente a la familia Asteráceas nativa de la región tropical de Sudamérica específicamente de Paraguay, desde hace varias décadas se comenzó a cultivar debido las propiedades que presenta como edulcorantes, es considerada una planta medicinal puesto que se ha demostrado tener efectos beneficiosos sobre la diabetes II, por su efecto de endulzamiento sin calorías [9].

La Stevia (Stevia Rebaudiana Bertoni) es considerada una planta potencialmente industrial, debido a que es utilizada como anticancerígena, antidepresiva, antiviral, antimicrobiano, además de mantener un control sobre la hipertensión [10]. Actualmente en Japón el 41% de los endulzantes consumidos provienen de la planta, siendo un sustituto del azúcar para personas con padecimientos diabéticos [9].

El desarrollo de la planta se da preferentemente en climas con lluvias que van desde los 1400 a 1800 mm anuales, y con temperaturas que van entre los 15 y 33 grados centígrados, si la intensidad de la iluminación es alta y los fotoperiodos largos suelen favorecer el desarrollo y crecimiento en el área foliar [10].

La reproducción de la Stevia (Stevia Rebaudiana Bertoni) puede ser de manera sexual mediante la implementación de semillas o de manera asexual, a través de plántulas o esquejes. La propagación por esquejes es el método más conveniente para ser utilizado en una escala comercial, con el cultivo

de una planta madre Stevia, la cual va proveer de material vegetativo para llevar una sobreproducción de material vegetativo [11] .

En este estudio se presenta una propuesta de diseño innovador de un prototipo para el cultivo de una planta madre de Stevia (Stevia Rebaudina Bertoni) en fase vegetativa, destinada a la producción de esquejes, utilizando un sistema de monitoreo basado en Arduino UNO. La propuesta se centra en el diseño de una cámara de crecimiento y en el monitoreo del ambiente interior, específicamente en la regulación de la temperatura y la humedad relativa, así como en el control automatizado del riego mediante temporizadores. Se emplean sensores para la medición de datos, los cuales se recopilan y almacenan en una base de datos. Además, se evalúa el prototipo en términos de la eficacia de los materiales utilizados para mantener las condiciones climáticas internas, impidiendo la entrada y salida de factores externos. El objetivo principal es crear un área experimental para el desarrollo y crecimiento de una planta madre en fase vegetativa para la producción de follaje, con el fin de obtener una fuente continua de esquejes para la sobreproducción de la planta de Stevia (Stevia Rebaudiana Bertoni),

2. Trabajos Relacionados

La aplicación de la técnica del cultivo in vitro es una de las primeras técnicas que aunque no lleve algún uso de tecnología, permite al cultivo desarrollo en un ambiente totalmente cerrado, adaptando la planta a las características del lugar en que se coloca, la siguiente aplicación fue realizada para obtener diferentes características de crecimiento al ser expuestos a condiciones distintas en cuanto a la iluminación, haciendo implementación de luz natural, de luz artificial y en condiciones de ausencia de luz, se colocaron tres especies de Melocactus (zehntneri, sergipensis, violaceus) en escenarios diferentes: Invernadero, en el cual se realizó la aplicación de luz natural, una sala de crecimiento, donde se implementó luz artificial, que consta de iluminación fluorescente haciendo uso de colores como rojo, blanco y azul, en la última sala de crecimiento se aplicó la ausencia de luz, al hacer comparaciones en cuanto al desarrollo de en las distintas condiciones, se determinó que el mayor registro de sobrevivencia se dio en el invernadero expuesto a luz natural con un porcentaje del 93.3% para el Melocactus zehntneri, un 86.7% para el Melocactus sergipensis y un 78.7% para el Melocactus violaceus, el cultivo en el cual hubo ausencia de luz únicamente comenzó a germinar el Melocactus violaceus siendo una germinación muy lenta y para el cultivo expuesto a luz artificial la sobrevivencia de las tres especies de Melocactus fue de un 9.3% mayor en comparación con el cultivo en ausencia de luz [11].

Los modelos de crecimiento para cultivos en espacios de ambientes controlados han sido implementados en la actualidad, debido a su alta capacidad de monitorear las condiciones climáticas para el crecimiento en plantas, en el siguiente desarrollo se desempeñó un modelo de crecimiento en una caja gris donde se estimó el rendimiento y la demanda y uso de energía de espacios de agricultura en un ambiente controlado de alta densidad, el modelo se trabajó en un cultivo de lechuga existente que se desarrolló en in invernadero, donde ajustaron los parámetros especifico y calibrándolos, antes de las modificaciones y calibración el modelo inicial se sobrestimo el índice de área foliar lo cual se dedujo que conducía a una mayor demanda energética específica para la calefacción y des humificación, además de que se sobreestimo la tasa de crecimiento, lo cual condujo a subestimar el uso específico de energía para la mayoría de las condiciones, lo cual los llevo a la conclusión de ajustar el modelo para aplicaciones en ambientes controlados para poder reducir el uso de energía y obtener más ahorro de la misma, el modelo de cultivo dinámico lo implementaron para observar los intercambios de calor de los cultivos a medida en que crecen en un espacio cerrado de alta intensidad, también se puede utilizar para el análisis energético de las condiciones ambientales interiores con el ajuste de parámetros climáticos [12].

El diseño en armarios de cultivos se ha implementado en la actualidad para el desarrollo de ambientes controlados orientados al crecimiento de vegetación. El siguiente armario de cultivo es una patente caracterizada por manejar un diseño de estructura rectangular de material rígido, la cual en su interior maneja varias separaciones y cabinas, donde tiene ventilación e iluminación programable para ayudar

con la temperatura y humedad que se consideran adecuadas para el desarrollo de proliferación y secado de la plantas, donde se puede clonar, injertar, vegetar, florecer y secar infinidad de plantas, mediante métodos de cultivos existentes como hidroponía, aeroponía u orgánico, ya sea en tubos, cubetas, macetas, para uso tanto industrial como doméstico [13].

Los armarios de cultivo son una opción para los cultivos en interior que se encuentra en el mercado, la siguiente patente trata de un armario que está caracterizado por tener un cuerpo prismático rectangular de un material apropiado, en la cara posterior se ha previsto que tenga una sujeción del armario sobre alguna pared dentro de una vivienda. Está constituido por varios pisos, que son una bandeja o estante, con una orientación prácticamente horizontal con una ligera inclinación hacia los lados, que servirá de ayuda para el desagüe que se utiliza para el riego. En las bandejas contendrá una bolsa de sustrato, en la cual se sembraran las plantas que se pretendan cultivar, cada planta se sitúa de manera frontal a una puerta abatible que contiene orificios a través de los cuales las plantas saldrán al exterior, de manera que crezcan de forma ascendente o bien crecer de forma colgante hacia abajo. En la parte inferior del armario se han previsto dos depósitos que servirán para el riego y otro para el desagüe que se encuentra debajo de la inclinación de las bandejas donde el agua de riego que se utilizó caigo sobre el mismo, ambos depósitos estarán cubiertos con una tapa practica superior, por la cual se accede a ambos depósitos para su llenado y vaciado. Las bandejas al igual que las tapas serán herméticas para evitar el derrame del agua hacia el exterior del armario. La puerta o tapas frontales se desean una para cada nivel para evitar molestar a las otras plantas cuando se va realizar alguna manipulación en alguna en las plantas, abriendo solamente la puerta donde se encuentre dicha planta. El riego se lleva a cabo desde el depósito de riego mediante una bomba que impulsará el agua que estará en el fondo del mismo, que se distribuirá a través de cada bandeja en forma de goteo. El armario contara con una toma de corriente que ayudara con el funcionamiento de la bomba o incluso para la alimentación de medios de iluminación que pueden estar sujetos en presillas, estas presillas no solamente servirán para poder soportar elementos de iluminación, sino que también servirá para otros accesorios [14].

Entre las consideraciones importantes en cuanto a armarios de cultivo interior es la elección de materiales, tratando de asegurar un ambiente controlado y óptimo para el desarrollo de las plantas [15].
La madera es utilizada en distintas estructuras debido a la alta resistencia, durabilidad adecuada para estructuras que requieren de una duración de tiempo y soporte de peso, es considerado uno de los materiales con facilidad de trabajo, lo cual facilita la manipulación, corte y ensamblaje al momento de la construcción, además de las propiedades aislantes naturales y menor impacto que tiene en el medio ambiente al ser un material natural genera residuos orgánicos no contaminantes [16].

Para la conservación de la madera y prologar su tiempo de vida, se hace uso de protectores para madera, los cuales penetran y protegen la madera sin crear recubrimientos superficiales, manteniendo la apariencia natural de la madera y repeliendo el agua o humedad que puedan estar presentes en el ambiente [17].

Las técnicas de cultivos utilizadas en el cultivo de plantas en ambientes controlados, son la hidroponía, aeroponía, acuaponía, entre otras, en las cuales hacen aplicación de materiales que ayuden al soporte de las plantas y sean ideales para almacenar agua para riego [18]. El uso del PVC como material para almacenamiento es ideal por su alta resistencia a la oxidación y corrosión al tener contacto directo con agua y humedad, además de caracterizarse por ser un material ligero y fácil de instalar, al mantener dichas propiedades es implementado en las distintas técnicas de cultivo en interior [19].
Los materiales térmicos que se utilizan en los cultivos de vegetación en ambientes cerrados, ayuda a reducir la perdida de temperatura lo cual ayuda con la disminución al momento de implementar sistemas de calefacción lo que hace una reducción de energía, los materiales térmicos pueden mantener la temperatura en el interior por más tiempo.

3. Materiales y Métodos

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 7, pp. 78 - 90.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024

En esta sección se presenta la metodología seguida para la propuesta de prueba fase experimental del diseño y control de un prototipo de cámara de crecimiento para una planta madre de Stevia (Stevia Rebaudiana Bertoni),

En la Figura 1 se presenta los pasos de la metodología a seguir para el desarrollo de la prueba en fase experimental, partiendo desde el análisis y diseño hasta llegar a la parte de los resultados. Los pasos seguidos se explican posteriormente a más detalle en este documento.

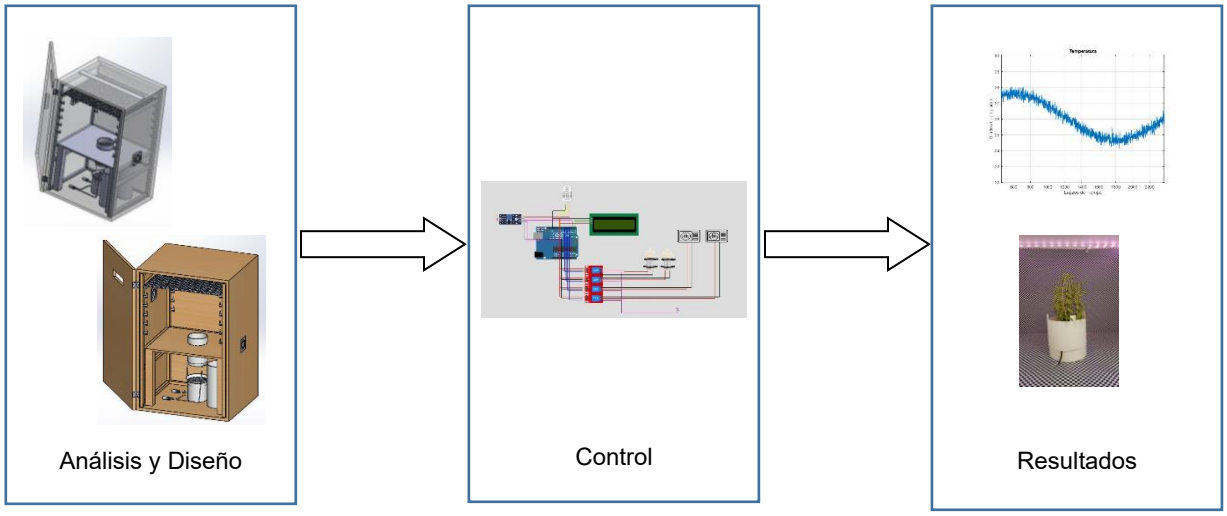


Figura 1. Metodología Propuesta para el Seguimiento de Pasos de la fase Experimental.

Para el diseño del modelo inicial del prototipo se utilizó “SOLIDWOKS”, el cual es un software especializado en diseño 3D, cuenta con diseño asistido por computadora al moldear piezas, ensambles en 3D y planos en 2D. SOLIDWORKS ofrece un conjunto de herramientas que sirve para crear, realizar simulaciones, administrar datos, gestionar proyectos, procesos maximizando la innovación y la productividad de los recursos para ingeniería, la gestión de estas herramientas permiten la organización para diseñar productos mejores de una manera más rápida y de manera rentable. Actualmente presenta soluciones de fabricación inteligente, diseño y análisis, diseño eléctrico, gestión de datos, proyectos y procesos [20].

En el diseño CAD de la cámara de crecimiento para planta madre Stevia (Stevia Rebaudiana Bertoni) fue realizado de manera modular, creando cada una de las piezas del sistema de manera individual y continuar con el ensamble para la construcción del diseño final. Para el modelado de las piezas individuales en 3D, se utilizó las herramientas de extrusión de pieza y corte, con el fin de dar forma a las piezas, además de agregar detalles como “Chaflán” para redondear los lados de algunos de las piezas. Una vez creadas las piezas se combinaron en un ensamblaje, lo cual permitió la interacción y asegurar que todas encajen verificando que las medidas dadas fueron las correctas al momento de ensamblar, en este caso se utilizó restricciones y relaciones de posición para definir las piezas y evitar movimientos.

En la Figura 2 se presenta la conceptualización en CAD del diseño innovador de nuestro prototipo de Cámara de Crecimiento Vegetal destinada al desarrollo de un planta madre para producción de esquejes, se puede apreciar cómo se hace la distribución de los espacios y elementos, además de mostrar las dimensiones de cada uno. En el inciso a) se puede apreciar una vista frontal mostrando los elementos en conjunto visualizados desde esa vista, además se muestran las dimensiones de altura y ancho, teniendo medidas de 147 x 90 cm. En el inciso b) se observa una vista isométrica desde la parte inferior, mostrando la distribución de los depósitos de riego ubicados debajo de la bandeja extraíble. En el inciso c) se muestra una vista lateral donde se observan las dimensiones de

profundidad, altura de bandeja extraíble, espacio de crecimiento y ventiladores, teniendo las siguientes dimensiones 80 x 60 x 85 cm y 14 x 14 cm. En el inciso d) se observar una vista inferior, donde se visualiza las conexiones de los depósitos de riego, mangueras y bombas, además de mostrar las dimensiones de ancho, profundidad y ancho de la puerta, teniendo las siguientes medidas, 80 x 90 x 95 cm. En el inciso e) se observa una vista isométrica desde la parte superior, donde se visualiza la parte superior de la bandeja extraíble, la colocación de la lámpara y el mallado.

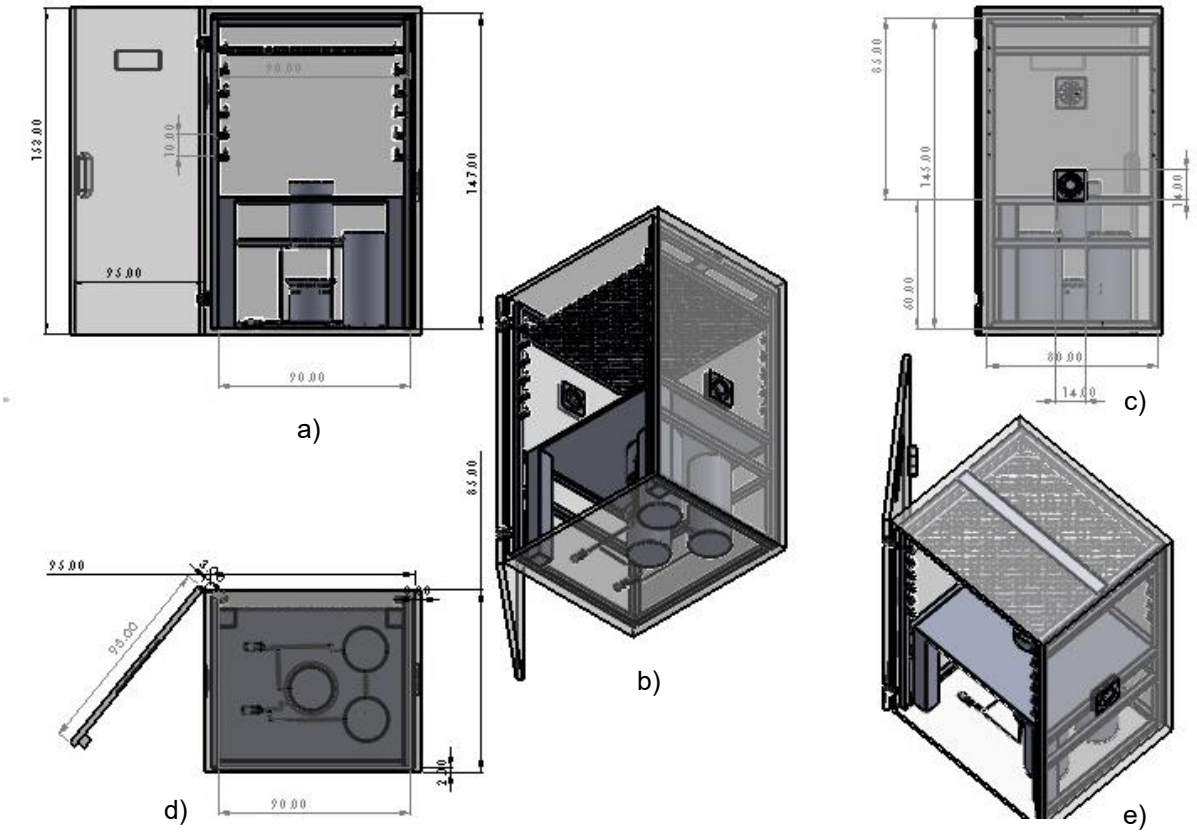


Figura 2. Conceptualización Diseño Final de Cámara de Crecimiento: a) vista frontal; b) vista isométrica inferior; c) vista lateral; d) vista inferior; e) vista isométrica superior.

En la Figura 3 se presenta el acabado de los materiales, ilustrado a través de un renderizado detallado. Este renderizado permite una evaluación detalladas de las texturas, colores y propiedades superficiales que pueden presentar los materiales empleados, proporcionando así una representación de su apariencia final, lo cual es crucial para el diseño de la cámara de crecimiento. El nivel de detalles puede asegurar que las características visuales y físicas de los materiales se alineen a la manufactura del prototipo.

Figura 3. Renderización de materiales.

El diseño de la cámara de crecimiento cuenta con distintos elementos distribuidos en secciones para el acoplamiento de las necesidades para el desarrollo de la planta, además de la colocación de los sensores que servirán para el monitoreo en cuanto al ambiente en el interior, tomando valores como la temperatura, humedad relativa.

El diseño se caracteriza por estar constituido por un cuerpo prismático rectangular, con una estructura rígida, en donde la parte frontal consta de una puerta con un método de sujeción para cerrarla. En el interior de la cámara se hace la división de 2 partes, la primera para la colocación de la planta madre y el crecimiento del follaje extendido hacia arriba, la segunda parte inferior está destinada para la colocación de los depósitos de riego y el crecimiento de la raíz hacia la parte de abajo, la cual se encuentra suspendida en una malla de acero inoxidable.

En el interior se encuentra una bandeja extraíble con dos soportes en el frente donde se colocara la planta madre, la cual cuenta con un orificio en el centro por el cual se drenara el exceso de recursos hídricos y caerán por gravedad a un contenedor de 4L. Para el diseño del contenedor de la planta, se coloca una estructura tubular, donde en la parte media utiliza una malla que ayudara al soporte y caída de la raíz, utilizando técnicas de cultivo como hidroponía y aeroponía.

En la parte inferior se ha previsto la colocación de 3 depósitos que ayudaran con el ciclo del riego, en los cuales se coloca el agua para el riego con conductos emergentes de mangueras que distribuirán el riego hacia la parte de la raíz y la parte del follaje de la planta, otro está destinado para que el agua de riego caiga dentro y de allí valla deposito con un filtro, los tres estarán conectados mediante mangueras que formaran el ciclo de riego haciendo una reutilización del agua, utilizando 2 bombas de agua alimentadas por 12v que mantendrán un flujo entre el sistema de contenedores.

En la Figura 4 se observa las conexiones de las mangueras con los depósitos hídricos destinados al riego. Estas conexiones facilitan la transferencia eficiente de agua que van desde los depósitos hacia la planta madre mediante un sistema de bombas. Durante el ciclo de riego, el flujo de agua es reutilizado gracias a un filtro conectado en la bomba 2, el cual permite la reutilización del riego, minimizando el desperdicio de agua y mejorando su eficiencia.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 7, pp. 78 - 90.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024

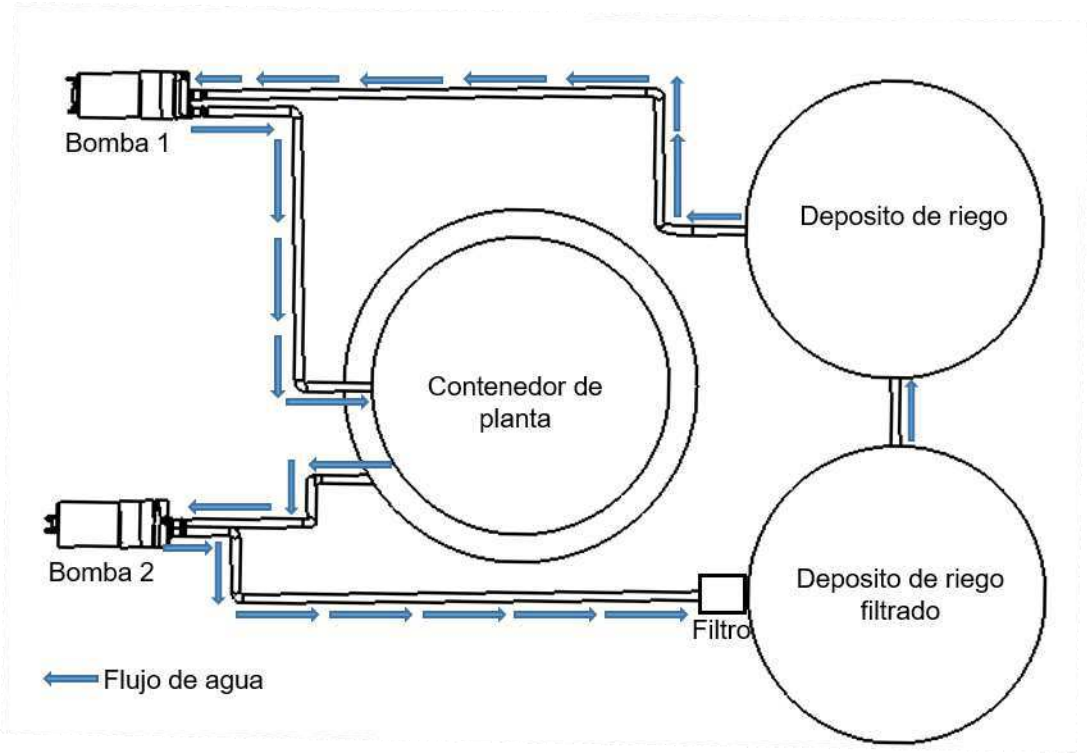


Figura 4. Conexión de Depósitos.

Las mangueras se conectan del primer deposito hacia el contenedor de la planta donde se hará el riego en forma de rocío con ayuda de aspersores, siguiendo de la caída del agua al contenedor colocado debajo de la planta, el cual cuenta con un filtro de malla para evitar el paso de impurezas, para después pasar al tercer contendor donde el agua es filtrada para evitar el paso de residuos más pequeños, limpiando el agua y permitiendo la utilización para posteriores riegos.

La estructura cuenta con 2 extractores de aire en las paredes laterales, para la circulación y flujo constante del aire, uno se encuentra a la altura del contenedor de la planta que permite el ingreso del aire y el segundo en la parte superior para permitir la salida del aire. La circulación de aire permite regular la temperatura del espacio, puesto que el aire caliente es menos denso que el aire frio y tiende a subir, el extractor de la parte superior ayuda a la salida del aire caliente que se comienza a acumular en la parte superior, con la ayuda del extractor en la parte inferior permite la entrada de aire con una mayor densidad el cual permite el enfriamiento en el espacio interior [21].

En la parte superior cuenta con la colocación de luces LED, que ayudaran para la radiación necesaria para el crecimiento de las plantas en interiores, la intensidad dependerá según la especie de planta y la fase en que se encuentre. La iluminación es necesaria para el trabajo de fotosíntesis de las plantas, el cual es el proceso de absorber y convertir la iluminación en energía, el tiempo de exposición de iluminación es importante, la mayoría de las plantas necesitan al menos 6 horas de luz al día, sin embargo otras llegan a requerir hasta 16 horas, estas características dependen de la planta y la fase de crecimiento en la que se encuentran [22]. En la parte superior trasera se ubica un orificio para la colocación de sensores, con el fin de estar monitoreando la humedad relativa, temperatura e iluminación.

Además, se incorporaron 2 cámaras RGB para la visualización del crecimiento de la planta, una colocada en la parte frontal en la puerta y la otra en la parte superior para obtener una vista alzada de la planta. En la puerta encuentra una ventanilla de acrílico para la visualización de la planta desde el exterior sin la necesidad de abrir la cámara, utilizando una tapa con bisagras que permite visualizar el interior y evitar el ingreso de iluminación natural del exterior al encontrarse cerrada.

La construcción del prototipo se definió en medidas dadas por el diseño CAD, el cual se basó en la distribución de componentes que se colocarían en el interior, además de las dimensiones de crecimiento de la planta, tomando en cuenta que el crecimiento deseado es el tamaño del arbusto. En el interior de la cámara se colocó un material térmico mediante presión y se colocó vinil cuadriculado con separaciones entre cuadros de $1cm^2$.

Se realizaron cortes y ensambles de piezas de madera para formar la estructura al igual que la bandeja extraíble que funciona como soporte para el contenedor de la planta, se colocaron los elementos en el interior de la cámara, en la parte superior de la bandeja extraíble se conectaron los depósitos de riego con mangueras y aspersores para realizar el riego.

Para la conservación y estabilización de los factores ambientales internos se implementó un sistema de control basado en una placa de desarrollo Arduino uno, la cual nos permite establecer conexiones entre el controlador y los distintos sensores. Se implementó un sensor digital de temperatura DHT22 para la medición de temperatura y humedad relativa, esto mediante una pieza capacitiva que mide las propiedades del aire circulante y transforma esta medición en una señal para su sencilla lectura a través de los pines de comunicación.

Se añadió un módulo de 4 relevadores, estos son dispositivos electromagnéticos que cumplen la función de un interruptor automático, permitiendo abrir o cerrar el paso de la corriente eléctrica. Los relevadores se accionaban en función de límites establecidos para la humedad relativa y temperatura interior de la cámara y se encargan del encendido y apagado de la ventilación mediante dos extractores de aire, así como dos bombas de agua suplementadas por 12v para el riego y flujo en el sistema de depósitos hídricos, además de integrar el cableado y conexiones de bombas de agua que mantendrán el flujo del agua de riego.

En la Figura 5 se muestra el diagrama de conexiones para la comunicación entre la placa de desarrollo Arduino UNO y los elementos externos de comunicación y accionamiento.

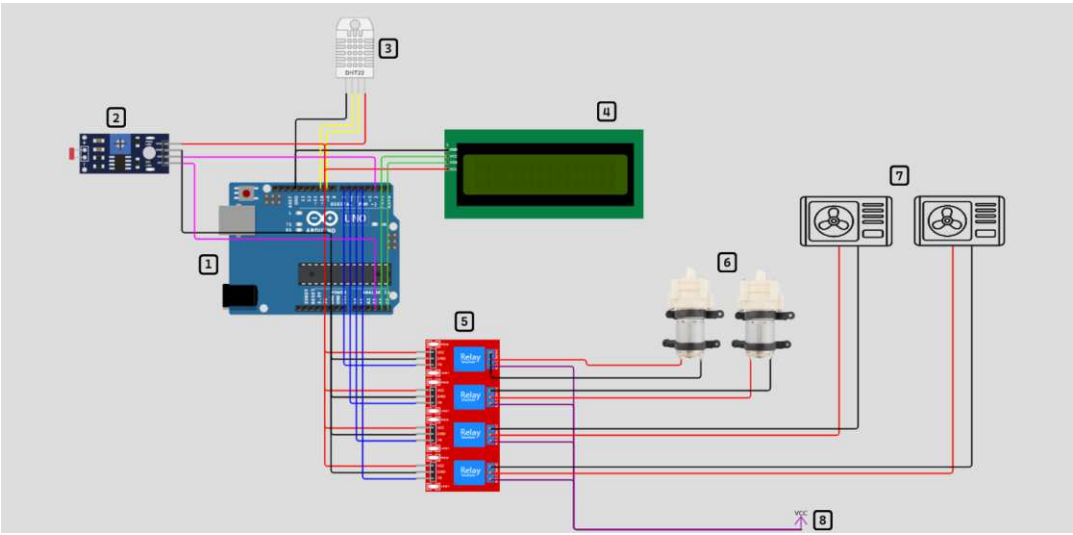


Figura 5. Diagrama de Conexiones.

1. Placa de Desarrollo Arduino UNO
2. Módulo de Iluminación con Fotorresistor
3. Sensor de Temperatura DHT22
4. Pantalla LCD 16X4
5. Módulo de Relevadores
6. Bombas de Agua
7. Extractores de Aire

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 7, pp. 78 - 90.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024

8. Alimentación de 12v

Al mismo tiempo que se controlan las condiciones internas de la cámara de crecimiento el sistema es capaz de mostrar los valores de temperatura, humedad y tiempos de riegos mediante una pantalla LCD para la supervisión del funcionamiento, además de estar grabando dichos datos en un documento con extensión ".csv" el cual tiene la función de una base de datos para la posterior validación del sistema.
Diagrama de imagen

Al finalizar la construcción del prototipo se realizó una fase de prueba para su funcionamiento, se desarrolló el primer experimento que constó de 17 días en el cual se utilizó una planta Stevia (Stevia Rebaudiana Bertoni), la cual fue trasplantada con la tierra abonada. Durante el proceso de experimentación se hizo el monitoreo de temperatura y humedad relativa que mantenía el interior utilizando una base de datos que permitió crear un registro durante la fase experimental. El sistema de riego, se mantenía controlado en cuestión del tiempo realizando el riego 2 veces al día con duración de 4 segundos. La temperatura y humedad se obtuvieron valores constantes donde mantenía una temperatura entre 25 y 28 grados centígrados, en cuanto a la humedad mantenía intervalos que variaban de 10% y 70%.

4. Resultados

Con la implementación del diseño y la elección de los materiales adecuados fueron cruciales para la obtención de los resultados, en cuanto al ambiente mantenido en el interior, ya que la aplicación de cada elemento ayudo a una distribución adecuada en cuanto al espacio, de esta manera se optimizo el espacio para crecimiento de la planta en la altura y el crecimiento de la raíz.

Las condiciones interiores se mantuvieron constantes debido al sistema de control, mostrando una notoria variación en la humedad relativa, debido a que esta se veía influenciada en pequeña mediada por los riegos, en cambio esta variaba de manera notoria al momento de que los ventiladores se mantenían encendidos por lapsos prolongados, mostrando descensos en ciertos momentos y manteniéndose en rangos de 10% y 70% de humedad relativa dentro de la cámara.

En la Figura 6 se presentan la gráfica correspondientes a la humedad relativa registrada durante la fase experimental, la cual tuvo una duración de 17 días. Esta grafica permite visualizar las variaciones diarias que mantuvo la humedad relativa, proporcionado una comprensión más detallada de los datos obtenidos, permitiendo correlacionar los cambios en la humedad relativa con las respuestas observadas en el sistema experimental.

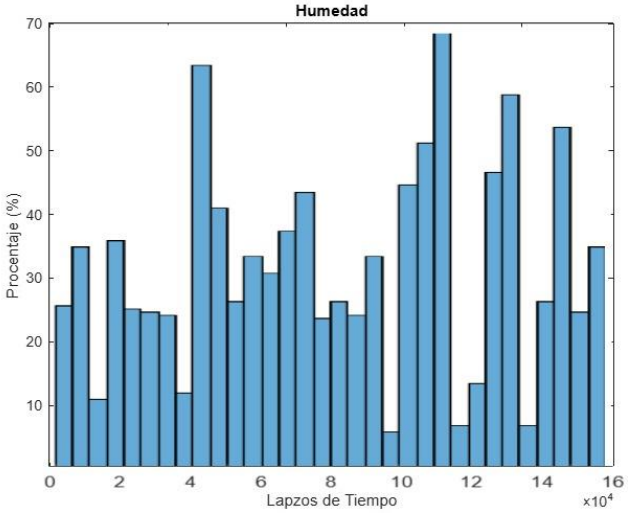


Figura 6. Grafica de Humedad Interior en Fase de Prueba.

En la temperatura se presentó un mayor control, debido a que se establecieron límites para los descensos e incrementos repentinos de temperatura, presentando demasiadas variaciones al momento de que el sistema encendía los ventiladores para controlar la temperatura y como esta se comportaba. Manteniendo la temperatura entre 24 y 28 °C.

En la Figura 7 se presenta la gráfica de control de temperatura correspondiente a la fase de pruebas, la cual barco un periodo de 17 días. Esta grafica permite visualizar los datos obtenidos durante el experimento, mostrando las variaciones de temperatura registradas, los datos recopilados proporcionan una base sólida para el análisis de temperatura que mantuvo en el interior de la cámara de crecimiento.

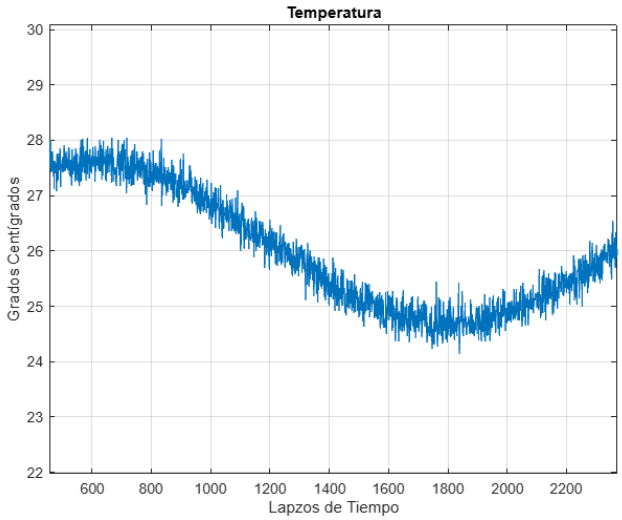


Figura 7. Grafica de Control de Temperatura en Fase de Pruebas.

El crecimiento observado en la planta durante el desarrollo de la fase experimental mostro resultados favorables, teniendo un crecimiento constante en altura y hojas nuevas en el follaje.

En la Figura 8 se presentan las imágenes correspondientes a la fase experimental de la planta madre Stevia (Stevia Rebaudiana Bertoni). Estas imágenes fueron capturadas los días 1, 8 y 17 del periodo experimental, permitiendo observar la evolución del crecimiento de la planta. Las imágenes documentan cambios en cuanto a la altura y crecimiento de nuevas hojas en el follaje, proporcionando una visualización clara de cómo las condiciones experimentales influyeron en el desarrollo de la planta.

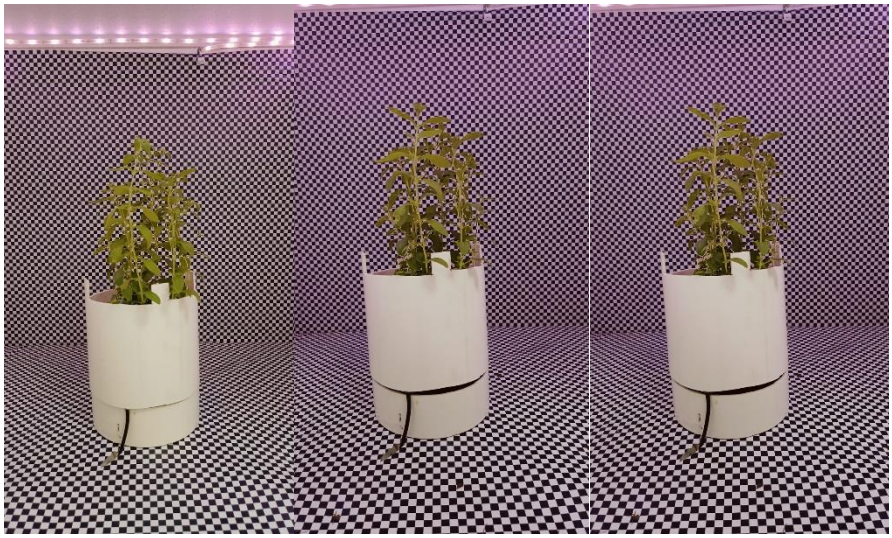


Figura 8. Fase experimental de la Stevia (Stevia Rebaudiana Bertoni)

5. Conclusiones

El diseño y selección en cuanto a los materiales para la construcción de la cámara de crecimiento demostraron ser eficaces en el cumplimiento de los objetivos establecidos, en cuanto a la primer fase experimental para observar el funcionamiento en conjunto del sistema de monitoreo y la aplicación de materiales para evitar la salida y entrada de factores externos. La implementación de un material aislante térmico fue fundamental para mantener las condiciones internas optimas por más tiempo para el desarrollo de la planta madre, el material redujo significativamente la transferencia de calor con el exterior evitando perdidas, permitiendo un control más preciso de la temperatura, la cual se mantuvo constante entre 25 y 28 grados centígrados aproximadamente. La estabilidad térmica favoreció notablemente el crecimiento de la planta madre, Stevia (Stevia Rebaudiana Bertoni), mostrando crecimiento en cuanto a su altura y nuevas hojas en el follaje. En base a los resultados obtenidos en la prueba, se identificaron áreas de mejora del prototipo, las cuales serán consideradas para realizar trabajos futuros como por ejemplo: la aplicación de un micro-controlador de mayor velocidad y memoria con el fin de escalar la implementación de nuevos sensores, además se adaptará una interfaz gráfica destinada a la determinación de valores, monitoreo y personalización de entornos internos. El diseño actual presenta condiciones aptas para el crecimiento de las plantas, sin embargo, el espacio en el interior podría ser optimizado de mejor manera, efectuando un rediseño que maneje una división entre el contenedor de la planta y los depósitos de riego, con el fin que la planta en el interior mantengan un mayor espacio de crecimiento, de igual manera poder reducir las dimensiones de altura y que se vuelva más fácil de transportar. Por último, es importante mencionar que la capacidad que tienen los sistemas de mantener climas bajo condiciones específicas es benéfico para producción de plantas en cultivos interiores, subrayando también la importancia de la elección de materiales adecuados en la construcción de equipos para aplicaciones agrícolas avanzadas.

6. Referencias

[1] SOCOLA RUEDA JORGE ISRAEL, «LA IMPORTANCIA DE LA AGRICULTURA PARA EL DESARROLLO SOCIAL Y ECONÓMICO DEL ECUADOR DURANTE LA ÚLTIMA DÉCADA», feb. 2022.

[2] E. R. Veitia Rodríguez, A. Montalván Estrada, y Y. Martínez López, «Elección de Indicadores Sistémicos para la Sostenibilidad Ambiental del Suelo», *Rev. Cienc. Téc. Agropecu.*, vol. 23, n.º 4, pp. 43-50, dic. 2014.

[3] R. Gorji, J. Skvaril, y M. Odlare, «Applications of optical sensing and imaging spectroscopy in indoor farming: A systematic review», *Spectrochim. Acta. A. Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 322, p. 124820, dic. 2024, doi: 10.1016/j.saa.2024.124820.

[4] M. D. Roca Ferrerfábrega, «Absorción de nitrato en cultivo sin suelo. Estudio de las implicaciones agronómicas y fisiológicas como base para optimizar el manejo de la fertilización. Aplicación a un cultivo de rosas.», Universitat Politècnica de València, Valencia, 2009. doi: 10.4995/Thesis/10251/6474.

[5] Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria-OIRSA, «MANEJO DE VIVEROS EN PLANTAS ORNAMENTALES Y FOLLAJES», GUATEMALA, GUATEMALA, 2001.

[6] A. Iriarte y G. Lesino, «COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO EN INVIERNO DE».

[7] D. A. Terán Alvarado, «Implementación de la tecnología emergente en maquinaria agrícola "», bachelorThesis, BABAHOYO: UTB, 2024, 2024. Accedido: 22 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/15896

[8] C. Menoni, D. Alonso, F. Saravia, N. Pérez, y L. Steinfeld, «Sistema de monitoreo y control de cultivo indoor de cannabis», *Mem. Investig. En Ing.*, n.º 24, Art. n.º 24, jun. 2023, doi: 10.36561/ING.24.12.

[9] M. Martínez Cruz, «Stevia rebaudiana (Bert.) Bertoni. Una revisión», *Cultiv. Trop.*, vol. 36, pp. 5-15, 2015.
[10] D. Oviedo Pereira, S. Alvarenga-Venutolo, S. Evangelista Lozano, G. Jiménez, y M. Rodríguez-Monroy, «Micropropagación de Stevia rebaudiana Bertoni, un Cultivo Promisorio para México», *BioTecnologia*, vol. 19, pp. 14-27, ene. 2015.
[11] P. del C. Paredes-Suárez *et al.*, «Enraizamiento de mini esquejes de Stevia rebaudiana bertoni con ácido indolbutírico en hidroponía», *Rev. Fitotec. Mex.*, vol. 44, n.º 3, pp. 367-372, sep. 2021, doi: 10.35196/rfm.2021.3.367.
[12] P. A. A. Santos *et al.*, «Do different cultivation environments influence the germination and initial growth of three threatened Brazilian cacti species?», *South Afr. J. Bot.*, vol. 132, pp. 363-370, ago. 2020, doi: 10.1016/j.sajb.2020.05.011.
[13] M.-H. Talbot y D. Monfet, «Development of a crop growth model for the energy analysis of controlled agriculture environment spaces», *Biosyst. Eng.*, vol. 238, pp. 38-50, feb. 2024, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2023.12.012.
[14] A. Sáez y M. Pilar, «54 Título: Armario de cultivo.».
[15] PAT CEPRIAN, NURIA y PASCUAL PEREZ, MARIA MILAGROS, 1 075 954, 11 de enero de 2012
[16] C. R. i Romeva, *Selección de materiales en el diseño de máquinas*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica, 2010.
[17] P. Guindos, *Fundamentos del diseño y la construcción con madera*. Ediciones UC, 2019.
[18] F. P. Sánchez, *Protección Preventiva de la Madera*. AITIM, 2001.
[19] B. Fasciolo, A. Awouda, G. Bruno, y F. Lombardi, «A smart aeroponic system for sustainable indoor farming», *Procedia CIRP*, vol. 116, pp. 636-641, ene. 2023, doi: 10.1016/j.procir.2023.02.107.
[20] M. V. Titow, *PVC Technology*. Springer Science & Business Media, 2012.
[21] «SOLIDWORKS - Qué es y para qué sirve», SolidBI. Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://solid-bi.es/solidworks/
[22] L. Huertas, «• Es uno de los factores medioambientales que hay que considerar, porque un mal control puede influir de manera negativa en los cultivos bajo invernadero».
[23] S. V. R. Zaldumbide, «Efecto de diferentes tipos de luz en el crecimiento de plantas in vitro: Revisión de Literatura», 2020.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 8, pp. 91 - 107.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Dispositivo Electrónico Inteligente para Medir el Consumo de Agua en el Sector Doméstico

Silva Rodríguez Guadalupe[1], Guerrero Osuna Héctor Alonso[1], Nava Pintor Jesús Antonio[1], Luque Vega Luis Fernando[2], Mata Romero Marcela Elizabeth[3] y López Monteagudo Francisco Eneldo[1].

[1]Posgrado en Ingeniería y Tecnología Aplicada, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas 98000, Zacatecas, México

[2]Department of Technological and Industrial Processes ITESO AC, Tlaquepaque 45604, México

[3]Subdirección de Investigación, Centro de Enseñanza Técnica Industrial, C. Nueva Escocia 1885, Guadalajara 44638, México

38192134@uaz.edu.mx

Resumen

En la actualidad la disponibilidad de agua, así como su calidad son dos de los problemas más urgentes a los que se enfrenta el país y el mundo. La aplicación de una mejora en la eficiencia de los sistemas de agua vinculado a la integración de dispositivos inteligentes favorece significativamente la sostenibilidad del sector hídrico. En este trabajo se muestra el diseño e implementación de un dispositivo electrónico orientado a la medición inteligente de agua en el sector doméstico empleando la tecnología de Internet de las Cosas. La arquitectura del dispositivo IoT propuesto está conformada por tres elementos principales: el hardware del dispositivo, un dispositivo de puerta de enlace (router Wi – Fi) y el servicio en la nube de Firebase. El sistema mide la cantidad de agua que pasa a través del sensor de flujo y envía los datos a la base de datos en tiempo real de Firebase, por lo que, es posible la monitorización en tiempo real del consumo de agua en la vivienda. El objetivo de esta aplicación es obtener un mejor acceso a la información y aprovechar las ventajas y facilidades que ofrece la inclusión de tecnología inteligente en los sistemas de medición con respecto a las técnicas tradicionales, tales como la monitorización remota y en tiempo real, tanto de las instituciones gestoras como de los propios usuarios, y por ende la concientización del uso excesivo por parte del usuario. El porcentaje de exactitud que se obtuvo fue de ±2 %, semejante a la exactitud de los medidores tradicionales, mientras que el consumo energético es de aproximadamente 6314.79 mAh en un periodo de 5 días continuos, por lo que es necesario recargar la batería de forma periódica.

Palabras clave: Internet de las Cosas, Dispositivos IoT, ahorro energético, medición de agua inteligente.

1. Introducción

Producto del constante crecimiento poblacional, la urbanización y el desarrollo económico, la gestión de recursos y la prestación de servicios se convierten en desafíos cada vez más importantes. En este sentido, la gestión del agua representa uno de los retos más críticos debido a la gran importancia de este recurso en la vida diaria, sobre todo por la alarmante escasez que se ha mostrado en los últimos años [1]. La escasez de agua queda definida como la condición en la que el recurso disponible no satisface las demandas actuales [2].

A partir de 1980, el uso de agua a nivel mundial ha incrementado a un ritmo aproximado del 1% cada año, esperando que se mantenga un ritmo semejante hasta 2050, llegando a alcanzar un crecimiento de entre 20% y 30% sobre el nivel de uso en la actualidad [3, 4]. Según estimaciones de la UNESCO, el incremento del consumo de agua ha superado dos veces la tasa de crecimiento poblacional durante el último siglo, por lo que, las predicciones sugieren que el mundo podría enfrentar una escasez global de agua de un 40% para 2030, mientras que para el año 2050, más de la mitad de la población mundial podría residir en áreas que sufren escasez de agua al menos una vez al año [5].

Por otra parte, la disponibilidad de agua en México presenta grandes desigualdades a consecuencia de las condiciones geográficas y diferentes topografías donde se encuentran los diversos asentamientos humanos [6]. En todo el territorio nacional, únicamente el 58% de la población recibe agua diariamente en su domicilio, además, el aumento en las extracciones de agua de cuencas y acuíferos ha causado un incremento significativo del grado de presión sobre el recurso, principalmente en las zonas centro y noreste, donde el indicador alcanza un valor del 55%. Cabe destacar que las extracciones para satisfacer los diferentes usos de agua en el país se han reducido en comparación con el siglo XX, sin embargo, las necesidades de agua para abastecer a las ciudades siguen en aumento, según las estimaciones, en 20 años, la brecha entre oferta y demanda será de 23 mil millones de metros cúbicos [7].

Particularmente, el estado de Zacatecas se distingue por la poca disponibilidad de agua, la demanda actual sobrepasa la oferta disponible con la infraestructura actual [8]. En este sentido, la problemática del agua en el estado radica, por un lado, en su condición natural de clima semidesértico con la consiguiente escasez de agua y la necesidad de una estricta gestión tanto de cantidad como de calidad; por otro lado, en la evolución socioeconómica y demográfica que concentra las demandas público – urbanas en la subregión Guadalupe – Zacatecas – Fresnillo, que es donde se localiza la mayor cantidad de población y la mayor actividad económica [9]. La alta demanda de agua potable en dicha subregión vuelve prácticamente imposible distribuir el servicio diariamente, según los informes de la Junta Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado de Zacatecas (JIAPAZ), por lo que es necesario recurrir a la rotación del servicio [10].

De forma tradicional, la gestión del agua se realiza utilizando medidores mecánicos debido a que se trata de dispositivos altamente confiables a bajo costo [11]. Sin embargo, este tipo de medidores limitan su funcionalidad a la captación de datos de caudal y la visualización mecánica del consumo de agua, por lo que, es necesario realizar la lectura del medidor de forma manual [12]. Si bien, gran parte de los países del mundo emplean medidores mecánicos, en los últimos años se han integrado de forma progresiva componentes de circuitos electrónicos a dichos medidores para dotarlos de funciones automáticas como la lectura automática de medidores (AMR, por sus siglas en inglés, Automatic Meter Reading), con estos avances se dio lugar a los medidores de agua electromecánicos y posteriormente al diseño de medidores puramente electrónicos adoptando nuevos principios de medición como el electromagnético, fluídico y ultrasónico [13].

Por otra parte, los significativos avances que se han presentado en los últimos años referentes a las tecnologías de medición y comunicación de datos han dado paso al uso de medidores de agua inteligentes (SWM, por sus siglas en inglés, Smart Water Meter) [14]. El medidor de agua inteligente consiste en un dispositivo que integra tecnologías emergentes de sensores, comunicación y electrónica para medir el volumen de agua, almacenar datos y transmitirlos a una frecuencia determinada [12, 15]. La optimización de la gestión del agua requiere de la instalación de sensores y actuadores que permitan la monitorización del servicio, por lo que, el uso de medidores inteligentes representa una excelente alternativa por sus múltiples ventajas, como el acceso a la información de forma instantánea y a larga distancia, tanto para clientes como para las instituciones gestoras, en comparación con los medidores de agua tradicionales que requieren de una lectura manual [15].

El objetivo de esta investigación es el desarrollo e implementación de un dispositivo IoT para medir el consumo de agua en el entorno doméstico, se utilizó un sensor de flujo de rueda de paletas integrado con un sistema electrónico para calcular el volumen de agua consumido procedente de la

red de suministro público, posteriormente se registran los datos recolectados en la base de datos en tiempo real de Firebase utilizando la red de comunicación Wi – Fi.

Las principales contribuciones de este trabajo son:

- Se propone la implementación de un medidor de agua inteligente no intrusivo, ya que se integra directamente en la toma proveniente de la red de suministro público.
- Los datos son enviados en tiempo a una base de datos a la que se puede acceder a través de Internet.
- Se evalúan técnicas de ahorro energético que permitan el correcto funcionamiento del dispositivo, sobre todo los días en los que hay servicio de agua.
- Proporciona datos valiosos tanto para los usuarios como para las instituciones gestoras, ayudando a la planificación, gestión eficiente y uso consciente.
- Fomenta la integración de tecnologías IoT en la medición de agua.

El resto de este documento se encuentra estructurado de la siguiente manera: en la sección 2 se describen la fundamentación y trabajos relacionados con la medición inteligente del agua. En la sección 3 se presenta el desarrollo del dispositivo IoT propuesto. La sección 4 analiza los resultados experimentales obtenidos, mientras que las conclusiones y trabajo futuro se describen en la sección 5.

2. Trabajos relacionados

El medidor de agua tradicional es un instrumento de medición que muestra el consumo de forma visual, generalmente se componen internamente por una turbina y engranajes mecánicos que transforman la velocidad de rotación que genera la turbina en una medida de caudal, generalmente expresada en metros cúbicos (m^3) [16]. Existe una gran variedad de medidores de agua mecánicos, diferenciándose entre sí según el mecanismo que utilizan: como los medidores de chorro único, de chorro múltiple, Woltmann, pistón oscilante y de disco nutante. Los medidores de agua modernos se desarrollaron a partir de medidores totalmente mecánicos, que adoptan un mecanismo de acoplamiento magnético con el cual es posible emplear un sensor de efecto Hall para detectar la rotación de los imanes dentro del medidor, logrando una rápida conversión de un medidor completamente mecánico a uno electromecánico [13].

Debido a los crecientes problemas de escasez de agua, además del deterioro de la infraestructura, durante los últimos años, se ha desarrollado un gran interés en la implementación de técnicas inteligentes en los sistemas hídricos, entre las que se encuentran la monitorización de sensores, envío de datos y control del sistema en tiempo real [17], impulsado la integración de medidores inteligentes de alta resolución en el sector hidráulico, debido a que esta tecnología desempeña un papel fundamental para la gestión inteligente de los sistemas de distribución de agua [18]. La literatura existente abarca una amplia gama de enfoques y aplicaciones, en esta sección se revisaron los estudios más relevantes en el campo, destacando las innovaciones tecnológicas, los desafíos a los que se enfrentan y las tendencias emergentes en el desarrollo de medidores de agua inteligentes.

Los medidores de agua inteligentes pueden ser adaptados a soluciones integradas, una aplicación moderna se centra en la conexión de sistemas electrónicos a un medidor mecánico tradicional para que sea capaz de realizar las mediciones de flujo de forma automática, además de registrar los datos recolectados y transferirlos de forma inalámbrica. La integración de soluciones AMR en medidores de agua que avanza progresivamente está relacionado esencialmente con protocolos de comunicación emergentes y con tecnologías dedicadas a Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés, Internet of Things) [11].

Nadipalli, L. S, et. al. [19], Propusieron un prototipo de medidor de agua inteligente basado en IoT empleando un sensor de efecto Hall y un microcontrolador ESP8266, además utiliza una plataforma en la nube conocida como Thinger.io donde se pueden visualizar las lecturas de caudal, volumen total, así como un indicador de consumo, con el que además es posible controlar el

suministro de agua, de tal manera que cuando el consumo diario supera un umbral preestablecido se toman acciones de reducción, o bien, suspensión del suministro de agua durante el resto del día. De manera similar, Amir, A., et. al. [20] desarrollaron un medidor inteligente con IoT que mide el caudal y volumen total, además de permitir al usuario determinar el valor de umbral de consumo requerido, en los resultados experimentales los autores registraron un error máximo de 0.03 litros en la medición del dispositivo, respecto a la medición manual utilizando un recipiente graduado.

Por otra parte, en Jha, M. K., et. al. [21], se propone un sistema de inteligente de agua que involucra tanto la medición del consumo de agua como el monitoreo de calidad de la misma en función de la medición de los parámetros más importantes para determinar la potabilidad del agua (pH, temperatura, turbidez y conductividad). Mientras que en [14] se propone un sistema IoT para el monitoreo y recopilación de datos del consumo final de agua residencial aplicado a diferentes accesorios de la vivienda, el dispositivo fue probado en el marco de una vivienda con un solo habitante, obteniendo como resultado en su análisis un error del 5% en el uso de agua total registrado al agregar los diferentes accesorios, respecto al consumo global medido con un medidor de agua tradicional.

En la investigación realizada por Raad, A. M., et. al. [22] se propone un sistema de medición inteligente basado en IoT en consideración con el consumo de energía, el sistema de medición presenta una precisión del 99% en las lecturas experimentales, además los investigadores proponen un algoritmo para la recolección de datos de medidores de agua (EDCDWM) con el fin de reducir la transmisión de datos a Internet. La implementación de dicho algoritmo puede reducir significativamente el consumo de energía de los nodos IoT, debido a que la duración de la batería de un nodo IoT se ve afectada por la cantidad de datos transmitidos, el resultado obtenido al aplicar dos versiones del algoritmo propuesto muestra una eficiencia promedio de 60% y 93% en ahorro energético para la versión del algoritmo EDCDWM-AS y EDCDWM-RD, respectivamente al ser probados en cuatro escenarios distintos.

Pimenta, N., et al. [11] discutieron el diseño un sistema AMR adaptable a medidores mecánicos tradicionales, utilizando un emisor de inducción que detecta la posición y el movimiento de un objetivo metálico ubicado en la rueda del medidor de agua mecánico, empleando comunicación inalámbrica NB-IoT, además se realizó un análisis del consumo energético del sistema propuesto donde se obtuvo un consumo medio de energía con una transmisión de datos al día de 208.5uW. Se probaron dos técnicas para recolección de energía utilizando una celda solar de 3V y 100mA y un microgenerador hidráulico de 12V y 10W, el estudio concluyó que para ambos casos la energía generada era suficiente para alimentar el sistema diseñado y almacenar energía en una batería recargable.

Finalmente, las investigaciones realizadas por Li, X. J., et al. [13] y Alrowaijeh, J. S., et. al. [23] describen de forma similar el desarrollo de un sistema inteligente de medición de agua implementando un microgenerador de turbina que adopta dos funcionalidades distintas, como sensor de flujo y como generador de energía en diferentes periodos de tiempo.

De acuerdo con la revisión de la literatura, se logra identificar una tendencia en los dispositivos de medición de agua inteligentes y su potencial para transformar las prácticas de gestión del agua a través de tecnologías avanzadas y metodologías innovadoras. La investigación presentada subraya la importancia del monitoreo continuo, la detección de fallas y la automatización de datos para optimizar los esfuerzos de conservación del agua y mejorar los sistemas generales de gestión de servicios públicos.

3. Materiales y métodos

El agua es de gran importancia para el desarrollo y progreso de la sociedad zacatecana, por lo que no se discute el uso irremediable del recurso, sin embargo, justificado por la poca innovación y desarrollo tecnológico que sirva de apoyo a la gestión, es evidente el uso desmedido e inconsciente del recurso [9], por encima de las necesidades reales. En este trabajo se presenta el diseño de un

dispositivo IoT para medir el consumo de agua en los hogares que registra los datos en la nube, de tal modo que los usuarios puedan acceder a ellos a través de Internet. El componente clave es un sensor de flujo de rueda de paletas conectado a un microcontrolador para procesar la información recopilada por el sensor y calcular el caudal de agua y volumen de uso total, para la transferencia de datos al servidor en la nube se utiliza la red de comunicación Wi – Fi.

3.1 Diagrama de bloques

La Figura 1 muestra un diagrama con la distribución de bloques del medidor inteligente propuesto.

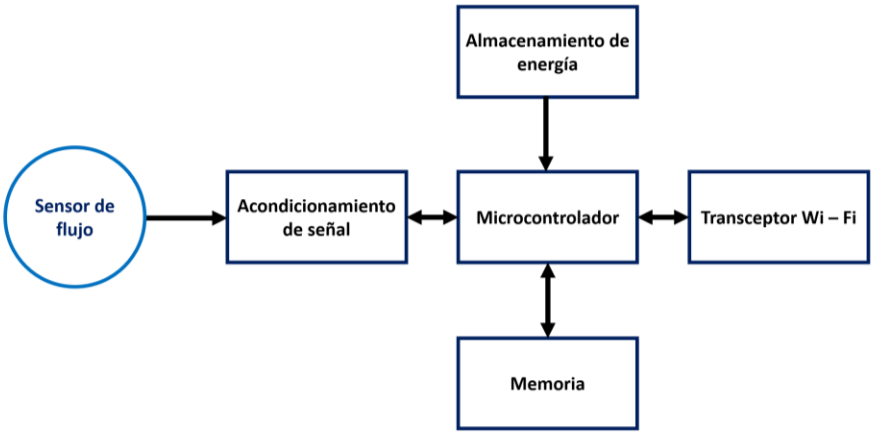


Figura 1. Diagrama de bloques del dispositivo electrónico.

A continuación, se describen cada uno de los bloques que integran el dispositivo IoT propuesto.

3.1.1 Sensor de flujo

El sensor seleccionado para implementar en el proyecto corresponde al Kit de medidor de flujo de 1/2” del fabricante AtlasScientific Environmental Robotics [24], el cual incluye un circuito totalizador universal, un medidor de flujo NPT hembra de ½” con un rango de flujo de 5.7 L/min a 75.70 L/min y una exactitud de +/- 10%, además de un prefiltro de acero inoxidable de malla 80 (178 micras). El sensor utiliza la frecuencia para calcular el flujo de agua, sin embargo, es importante resaltar que la relación entre la frecuencia y el volumen de agua no se da de forma lineal, por lo tanto, se debe realizar la conversión de frecuencia a volumen utilizando una ecuación de regresión lineal.

3.1.2 Microcontrolador

Para la implementación del proyecto en versión prototipo se utilizó la tarjeta de desarrollo Heltec Wi – Fi LoRa 32 (V2) la cual basa su funcionamiento en el módulo ESP32. Entre las principales características contempladas en la elección destacan que se puede utilizar con múltiples tecnologías de comunicación como lo son Wi - Fi, LoRa y BLE, está integrada con un sistema de gestión para baterías Li - Po, además de que cuenta con diversos modos de operación en baja potencia para ahorro de energía.

3.1.3 Acondicionamiento de la señal

El sensor de flujo tiene un rango de voltaje de 4 a 24V de CD y emite una señal cuadrada con amplitud igual al voltaje de alimentación, por lo tanto, es necesario realizar un acondicionamiento de señal debido a que el máximo voltaje de entrada para un pin del ESP32 es 3.3V. El componente

elegido para realizar esta función fue el módulo comparador de voltaje LM393. Un comparador de voltaje es un circuito analógico que entrega una salida de voltaje saturada, la cual depende de la comparación entre dos señales de entrada, un voltaje de referencia y un voltaje de entrada.

3.1.4 Red de comunicación

Para elegir el protocolo de comunicación se deben considerar criterios como el consumo de energía, rangos de cobertura, velocidad de los datos, usabilidad, etc. Existe una gran variedad de estándares de comunicación utilizados en IoT que ofrecen ventajas y desventajas respecto a sus similares de acuerdo con la aplicación que se esté desarrollando. En este caso se eligió el protocolo de comunicación Wi - Fi, debido a que se plantea implementar el dispositivo en el suministro de agua potable de una vivienda, por lo tanto, es posible utilizar un protocolo de corto alcance, puesto que la ubicación del sensor IoT se encuentra dentro del rango de cobertura, tomando en cuenta que en la actualidad la mayoría de los hogares tienen acceso a Internet.

3.2 Diseño de PCB

Como se muestra en la Figura 2, el circuito principal utiliza la tarjeta Heltec Wi – Fi LoRa 32 (V2) ensamblada en formato “Shield” y se utiliza el ADC interno de la misma para realizar el muestreo y estimación del caudal de acuerdo con la señal emitida por el sensor de flujo. La tarjeta PCB diseñada integra dos conectores JST al que se conecta la batería que alimentará el sistema (J4) y el restante se utiliza para agregar una fuente de alimentación alterna (J1) para alimentar la tarjeta con la posibilidad de cargar directamente la batería sin necesidad de retirarla del sistema. La administración de carga de la batería de alimentación se hace directamente a través del sistema de gestión para baterías Li – Po que incluye el microcontrolador. La Figura 3 muestra el montaje 3D de los componentes en el PCB propuesto.

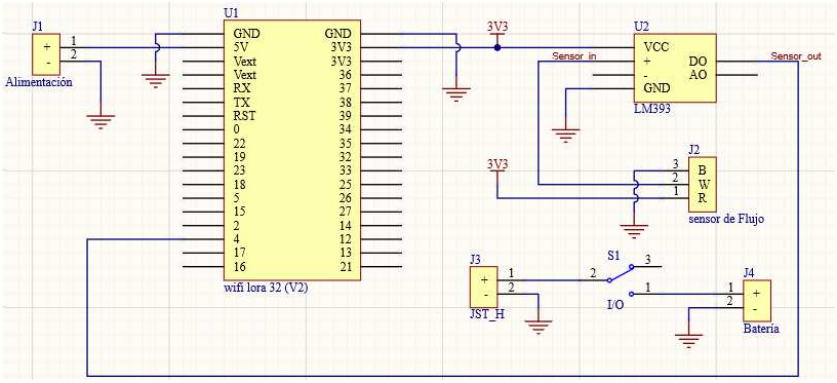


Figura 2. Diagrama esquemático del PCB.

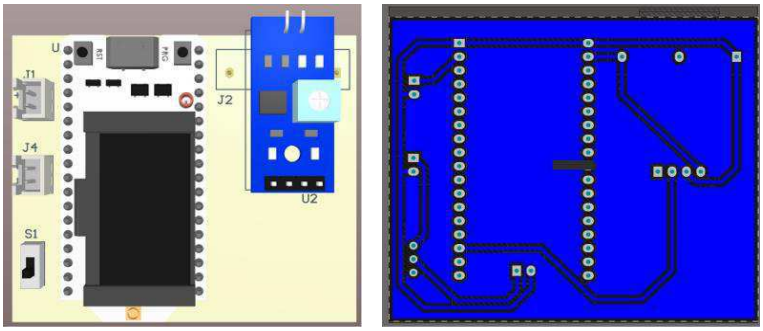


Figura 3. Montaje 3D del PCB propuesto.

3.3 Base de datos en la nube

El servidor en la nube de Firebase proporciona múltiples aplicaciones y funciones además de un servicio de backend a través de una API, mediante el cual es posible sincronizar datos en tiempo real en los servidores de Firebase sin la necesidad de programar demasiado código en el servidor [25]. En el desarrollo de este dispositivo se utilizan las aplicaciones de base de datos en tiempo real y la autenticación de usuarios que ofrece este servidor en la nube. En la Figura 4 se muestra la interacción entre el dispositivo IoT y la base de datos de Firebase, donde el dispositivo envía la información correspondiente al estado en que se encuentra el dispositivo y/o el registro de nuevas lecturas, a través de una ruta específica (path) que además indica el nodo donde se deben escribir los datos.

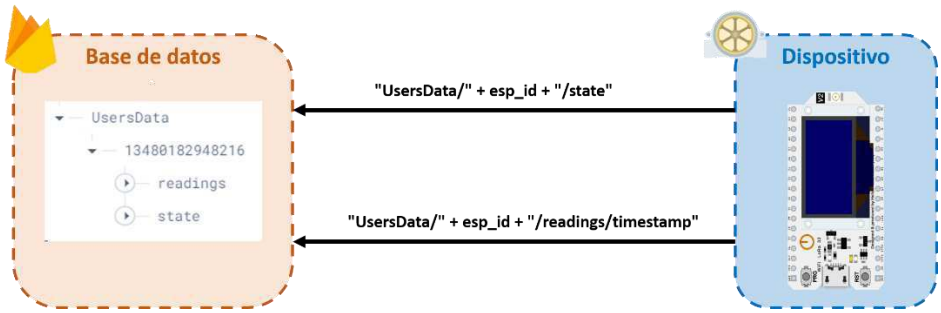


Figura 4. Almacenar datos en Firebase.

3.4 Diseño de banco de pruebas

Para fines de pruebas de funcionamiento y calibración durante el desarrollo del proyecto fue necesario contar con una infraestructura para realizar dichas actividades. De acuerdo con el planteamiento anterior, se diseñó un banco de pruebas según los criterios y especificaciones que ofrece la hoja de datos del medidor de flujo seleccionado [24].

3.4.1 Criterios de diseño del banco de pruebas

- En caso de que el agua que circula por el medidor de flujo contenga partículas, es necesario utilizar un prefiltro de por lo menos 80 micras. Si no se utiliza este elemento las palas de la turbina podrían atascarse. Cabe señalar que las paletas de turbina atascadas no necesariamente dañaran el medidor, pero no será posible obtener lecturas precisas hasta que el bloqueo haya sido eliminado.

- Para lograr que el medidor de flujo opere de forma correcta, el líquido que entra al medidor debe tener un flujo laminar aerodinámico, ya que la entrada de fluido turbulento hacia el medidor puede generar imprecisiones en el monitoreo del caudal. Para conseguir un flujo de líquido laminar se debe dejar un mínimo de 20cm (8”) de tubería recta justo antes de que el líquido entre al medidor.

- No es recomendable dejar que el líquido simplemente caiga del medidor, esto podría ocasionar que el aire entre al medidor y provocar lecturas inexactas. Para lograr lecturas precisas no debe haber aire en la línea.

En la Figura 5 se muestra el diseño final del banco de pruebas en cumplimiento de los criterios recomendados para obtener lecturas precisas. Se respetó la distancia mínima de tubería recta recomendada aguas arriba y a pesar de que la línea de conexión aún contenía otros elementos como el micro generador y la llave de salida, se optó por dejar una distancia similar a la salida del medidor.

También, se colocó una válvula de alivio con el fin de eliminar el aire proveniente de la línea de suministro y de este modo reducir al máximo posible la imprecisión en las lecturas.

Figura 5. Banco de pruebas para prototipo.

3.5 Calibración del sensor

El fabricante del sensor de flujo proporciona dos ecuaciones para calcular el caudal en función de la frecuencia emitida por el sensor. Esto se debe a que el medidor de flujo está diseñado para medir rangos de flujo que van de medio a alto (5.7 L/min hasta 75.7 L/min). En caso de que la aplicación donde se está implementando el dispositivo requiera monitorizar tasas de flujo menores a 15 L/min, se debe utilizar un adaptador de flujo bajo que también se incluye en el kit del sensor, la finalidad del adaptador de flujo es reducir el límite de flujo máximo a 45 L/min. En este caso, debido a que se busca medir el consumo de agua en los hogares y sabiendo que la presión de agua no supera los 45 L/min, además de que se presentan variaciones que generalmente se reflejan en la reducción de la misma, se tomó la decisión de utilizar el adaptador de flujo bajo.

Para comprobar la exactitud del sensor se realizaron mediciones de flujo de agua utilizando una placa Arduino Uno y la ecuación para flujo bajo proporcionada por el fabricante (1):

$$LPM = 0.2152 * [Hz] + 2.2928 \quad (1)$$

Donde:

- LPM es el caudal en [L/min].
- Hz es la frecuencia en [Hz].

Se midió la frecuencia emitida por el sensor y en base a esta se calculó el caudal en L/min y el volumen total en litros. Para calcular el volumen total se utilizó la ecuación (2):

$$V = V + \frac{LPM}{60} * t \quad (2)$$

Donde:

- V es el volumen en [L].
- t es el tiempo en [s].

Las pruebas se realizaron utilizando un cronómetro para tomar lecturas durante un minuto, después utilizando un recipiente graduado se midió el volumen real de agua, finalmente se realizó una comparación entre el volumen calculado y el volumen real para observar el grado de exactitud del medidor.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 8, pp. 91 - 107.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

3.6 Diseño de Software embebido

En la Figura 6 se muestra el diagrama de estados que describe el funcionamiento del dispositivo de medición inteligente. Cuando el dispositivo se enciende por primera vez se crea un punto de acceso para configurar las credenciales de la red Wi – Fi, una vez conectado a Internet el punto de acceso de desactiva y el dispositivo opera en modo estación. Si no se detecta señal del sensor de flujo, entra en modo Deep-Sleep para ahorrar energía, permaneciendo así hasta recibir una señal de activación. En este modo, solo el coprocesador ULP y el RTC se encuentran activos.

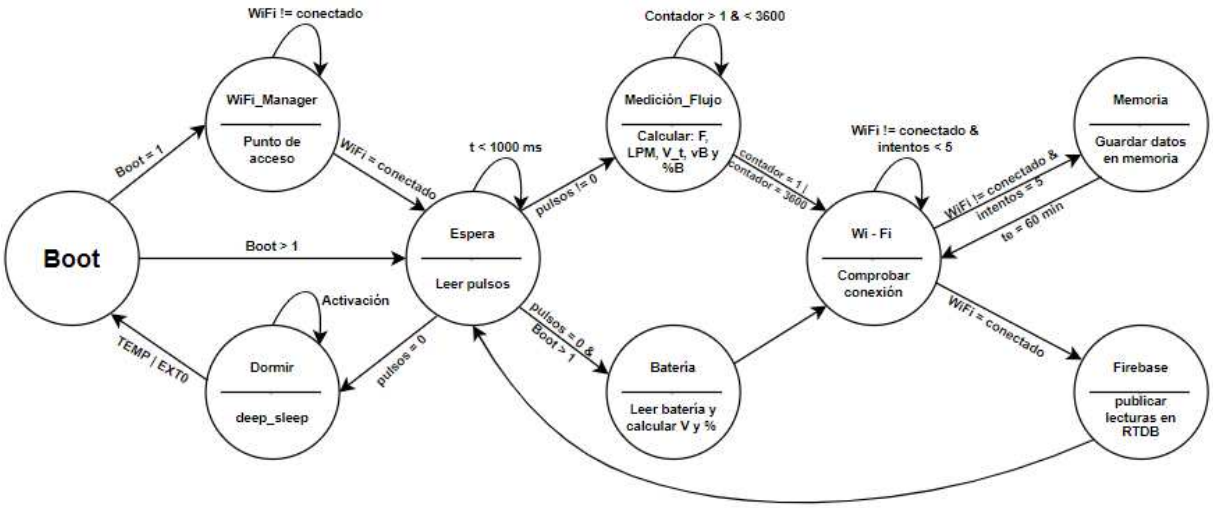


Figura 6. Diagrama de flujo del Software del Sistema.

El sistema se activa a través de un temporizador o señal externa. El temporizador activa el dispositivo dos veces al día para verificar el estado de la batería, actualizando la base de datos con el nivel de voltaje y carga disponible, luego vuelve a Deep-Sleep. La señal externa activa el dispositivo cuando hay flujo de agua, manteniéndolo activo mientras el sensor registra mediciones. Cuando el flujo termina, el dispositivo regresa a Deep-Sleep.

Para el cálculo del caudal se utilizó la ecuación resultante del proceso de calibración, la cual se presenta en la sección de resultados de este documento, mientras que para el volumen total se utilizó la ecuación (2). Respecto al cálculo del nivel de voltaje y porcentaje de carga de la batería, la lectura del voltaje se realizó a través del divisor de tensión que se encuentra en el diseño electrónico de la tarjeta Heltec utilizando la ecuación (3):

$$VB = VD * RT * \frac{MTM}{MVD} \tag{3}$$

Donde:

- VB es el voltaje de la batería
- VD es el valor digital leído en el ADC del microcontrolador
- RT es la relación de tensión
- MTM es la máxima tensión medida
- MVD es el máximo valor digital leído en el ADC.

Por su parte, para el cálculo del porcentaje de carga de la batería se utiliza una regla de tres simple:

$$porcentaje\ de\ carga\ = \frac{valor\ actual - valorminimo}{valor\ maximo - valor\ minimo} * 100 \quad (4)$$

Donde:

- “valor actual” es el voltaje actual de la batería,
- “valor máximo” es el voltaje correspondiente al 100 % de carga
- “valor mínimo” es el voltaje correspondiente al 0 % de carga.

Cuando el dispositivo necesita enviar información a la base de datos, verifica la conexión a Internet. Si hay conexión, envía el documento JSON. Si no hay conexión, intenta reconectarse durante 5 segundos, repitiendo el proceso hasta 5 veces. Si no logra conectarse, guarda la información en la memoria interna y la envía cuando se restablezca la conexión. La actualización de los datos se calculados se realiza en intervalos de una hora durante el tiempo que el sensor se encuentre funcionamiento.

4. Resultados

A continuación, se presentan los resultados de la metodología propuesta para el desarrollo del dispositivo IoT para la medición y monitorización del consumo de agua. Estos resultados se presentan en pruebas de desarrollo del dispositivo electrónico, así como la implementación en banco de pruebas y la respectiva recolección y almacenamiento de información.

4.1 Diseño y Desarrollo de Hardware

En la Figura 7 se muestra el dispositivo desarrollado integrado al banco de pruebas. El PCB cuenta con un switch para encender o apagar el sensor IoT, el LED indicador de encendido se encuentra en el módulo LM393, a través de este LED es posible saber que el dispositivo se encuentra activo y está listo para cuando se requiera tomar lecturas.

Figura 7. Vista completa del banco de pruebas en funcionamiento.

4.2 Resultados de calibración

El proceso de calibración inició analizando los datos generados por el medidor utilizando la ecuación del fabricante disponible en la hoja de datos del mismo. En la tabla 1 se muestran las lecturas obtenidas por el medidor.

Tabla 1. Lecturas de prueba para la calibración del sensor.

F(Hz)	LPM Calculados	Vol. calculado	LPM reales	Error
6	3.58	3.62	3.6	0.02
7	3.80	3.9	3.6	0.3
7	3.80	3.78	3.6	0.18
13	5.09	5.18	4.8	0.38
12	4.88	5.13	4.8	0.33
10	4.44	4.5	4.2	0.3
12	4.88	5.02	4.9	0.12
13	5.09	4.96	4.75	0.21
11	4.66	4.76	4.6	0.16
12	4.88	4.83	4.62	0.21
11	4.66	4.91	4.625	0.285
12	4.88	4.97	4.625	0.345
11	4.66	4.94	4.6	0.34
Promedio del error			0.2446 = 244.6ml	

Después de recopilar los datos, se analizó la diferencia de error entre el volumen calculado y el volumen real, obteniendo un promedio de 244.6ml. El porcentaje de error resultante no es muy significativo, incluso se encuentra dentro del rango de aceptación tomando en cuenta que la exactitud del sensor es de ±10 %. De acuerdo con los datos obtenidos en este análisis se logra una exactitud entre 4 % y 8 %. Sin embargo, se requiere que la exactitud del dispositivo sea igual o superior a la de los medidores utilizados actualmente en el mercado. Los medidores de agua utilizados por JIAPAZ en el estado de Zacatecas generalmente presentan una exactitud de ±2 %.

Por este motivo, a partir de los datos recopilados en las pruebas se calculó una nueva ecuación de regresión con la finalidad de reducir el porcentaje de error en las lecturas. En la Figura 8 se muestra la regresión lineal obtenida en función de los valores recopilados en las pruebas. Por lo tanto, se toma esta ecuación para calcular el caudal en el desarrollo final del software embebido.

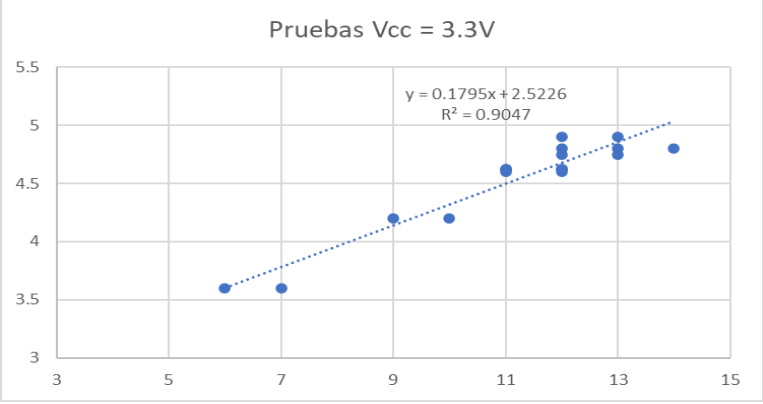


Figura 8. Ecuación de regresión lineal calculada.

Después de obtener la ecuación final se realizó una comparación de lecturas con la ecuación del fabricante y la ecuación calculada, los resultados de dicha comparación se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Comparación de ecuaciones.

F(Hz)	LPM - Fab	LPM - Cal	Vol. - Real	Vol. – Fab	Vol. - Cal	Error
12	4.88	4.68	4.88	5.06	4.83	0.05
13	5.09	4.86	4.92	5.05	4.84	0.08
12	4.88	4.68	4.87	5.01	4.8	0.07
13	5.09	4.86	4.92	5.06	4.84	0.08
12	4.88	4.68	4.8	5.01	4.8	0
Promedio del error					0.056 = 56ml	

4.3 Resultados de medición

En la Figura 9 se muestran los datos registrados en Firebase, el nodo de lecturas registra los nuevos datos recibidos en nodos de estampa de tiempo con el estado de la batería (nivel de voltaje y porcentaje de carga), así como los datos de la medición (caudal en L/min y volumen en L) registrados y procesados.

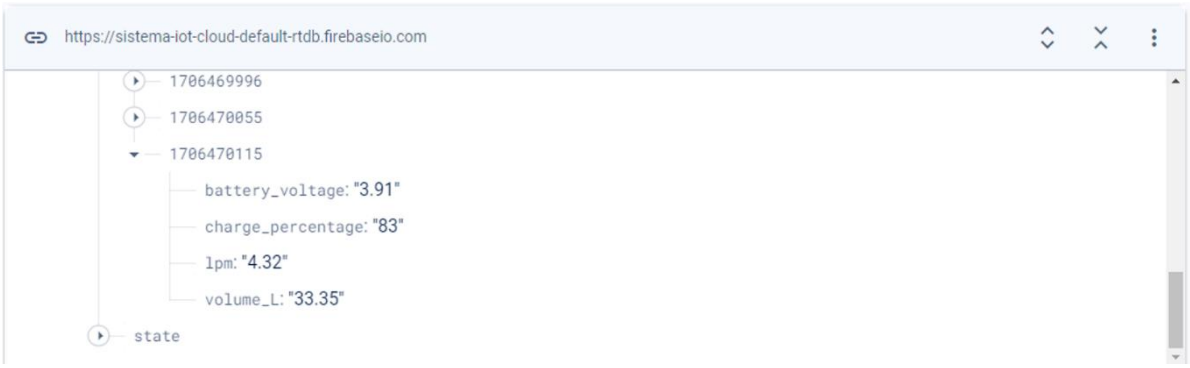


Figura 9. Actualización del nodo lecturas.

Por su parte, el nodo estado muestra el estado en el que se encuentra el dispositivo, en este caso “sensor midiendo”, tal como se muestra en la Figura 10. Una vez que el dispositivo deja de medir, se actualiza nuevamente el estado del dispositivo antes de que este entre en modo de sueño profundo.

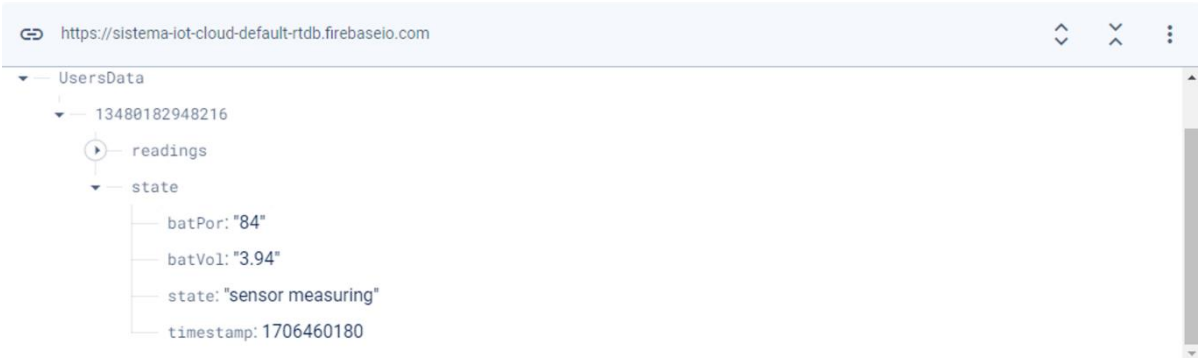


Figura 10. Actualización del nodo estado.

En la Figura 11 se muestra una gráfica de los datos de caudal registrados en la base de datos de Firebase.

Figura 11. Gráfica de LPM.

4.4 Análisis de Consumo energético

Una vez terminado el diseño y fabricación del dispositivo, así como haber comprobado la correcta funcionalidad del mismo, se realizó un análisis de consumo energético para seleccionar el último elemento a integrar, la batería que alimenta el sistema. Con este objetivo, se utilizó un dispositivo de medición llamado CurrentRanger para medir el consumo de energía cuando el dispositivo se encuentra en los diferentes modos de operación. Las mediciones correspondientes arrojaron los siguientes resultados: en el modo Deep – Sleep el consumo de energía es de 10.5mA (Figura 12a), cuando el sensor se encuentra tomando lecturas el consumo de energía se encuentra estable a aproximadamente 150.1 mA (Figura 12b) y cuando el dispositivo se conecta al Wi – Fi para publicar los datos en el servidor de Firebase el consumo de corriente aumenta hasta 244.5 mA (Figura 12c).

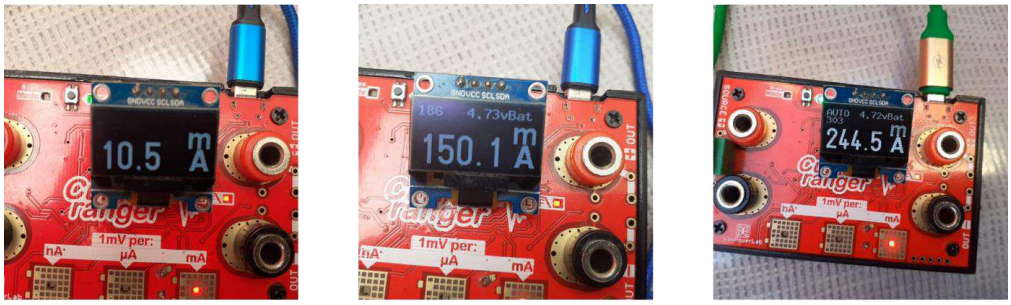


Figura 12. Mediciones de consumo en los diferentes modos de operación.

4.4.1 Consumo de energía un día sin servicio

El funcionamiento del dispositivo IoT los días que no se recibe el servicio en la vivienda es el siguiente: el dispositivo realiza dos activaciones de rutina, en las cuales el consumo de energía es de aproximadamente 244.5 mA, ya que se establece la conexión a Internet para la actualización del estado del mismo en la base de datos en tiempo real. Las demás horas del día se consume un promedio de 10.5mA, correspondiente al tiempo que el dispositivo se encuentra en suspensión. Considerando que el tiempo promedio que se tarda el dispositivo en establecer conexión Wi - Fi y publicar la información en Firebase es de 10 segundos lo que equivale a 0.002778 horas, se calcula el consumo en mAh utilizando la siguiente ecuación:

$$ConsumoPublicar = 244.5mA * 0.002778h = 0.6792mAh \quad (5)$$

Por otra parte, durante el tiempo que dura el dispositivo en modo dormido consume un total de:

$$ConsumoDormir = 10.5mA * 12h = 126mAh \quad (6)$$

Considerando que este proceso se realiza dos veces, se calcula que el consumo de energía durante todo el día es de 253.35mAh.

4.4.2 *Consumo de energía un día con servicio*

Por su parte, los días que se presenta el servicio de agua, el funcionamiento del dispositivo es el siguiente: el dispositivo recibe una activación externa y realiza una primera publicación de lectura y el estado actual del dispositivo. A continuación, realiza mediciones continuas hasta que el flujo de agua se detiene y realiza nuevas actualizaciones de lecturas una vez cada hora, mientras el dispositivo se encuentra exclusivamente en medición se consume un aproximado de 150.1 mA. Si el dispositivo se encuentra en funcionamiento continuo durante 12 horas:

$$ConsumoMedir = 150.1mA * 12h = 1801.2mAh \quad (7)$$

Si se realizan un total de 13 actualizaciones en la base de datos, entonces:

$$ConsumoPM = 0.6792mAh * 13 = 8.8296mAh \quad (8)$$

por lo que, en total un día de servicio el dispositivo consume 1936.03 mAh (sumando el consumo por medir 12 horas continuas, el consumo por publicar y el consumo en modo dormido las restantes 12 horas del día).

5. Conclusiones

En el presente trabajo de investigación se propuso el desarrollo de un dispositivo IoT para la monitorización del consumo de agua en el sector doméstico que cumpla con requerimientos como mediciones precisas, bajo consumo energético y conexión a Internet para el registro de datos en una base de datos en tiempo real. Después del análisis de resultados se concluye lo siguiente.

En este caso de aplicación, al utilizar la ecuación del fabricante para estimar el caudal y volumen de flujo se obtuvieron lecturas con un rango de exactitud entre ±4% y ±8%, por lo que, fue necesario ajustar la ecuación por medio de los datos registrados en las pruebas de calibración del sensor. Después de la calibración se obtuvo un error entre el volumen calculado y el volumen real en promedio de 56ml, la exactitud alcanzada se encuentra en un rango bastante aceptable, ya que, el porcentaje de error se redujo a valores menores a ±2 %, en comparación con el obtenido en el análisis de pruebas empleando la ecuación del fabricante, mientras que el rango de exactitud de los medidores tradicionales que utiliza actualmente JIAPAZ es de ±2 %.

Respecto al consumo energético, el consumo total del dispositivo durante 5 días de la semana es de aproximadamente 6314.79 mAh. Por lo tanto, se requiere una batería de mínimo 7000 mAh para alimentar el dispositivo y de esta forma garantizar el funcionamiento continuo del dispositivo los días que se recibe el servicio. Sin embargo, es importante aclarar que será necesario realizar el remplazo de la batería de forma constante (considerando que se utiliza una de 7000mAh) o conectar una fuente de alimentación externa que permita cargar la batería incorporada utilizando el sistema de administración de carga del microcontrolador, la eficiencia energética aún representa un reto y es necesario considerar nuevas estrategias para reducir el consumo energético del dispositivo y evitar así los constantes inconvenientes que provoca un almacenamiento limitado.

Las limitaciones del dispositivo IoT propuesto radican en la red de comunicación utilizada, ya que es completamente necesario que la vivienda donde se implemente el dispositivo cuente con conexión a Internet. Por otro lado, la aplicación del dispositivo requiere que este sea alimentado necesariamente por baterías, debido a que generalmente la toma de agua se encuentra fuera de la vivienda, por lo que el almacenamiento de energía representa otra limitación del sistema.

Los principales objetivos a futuro contemplan la integración de tecnología de recolección de energía a fin de lograr que el dispositivo sea completamente autosuficiente, ya que, en esta versión es completamente necesario recargar la batería de forma manual, también se pretende buscar alternativas de componentes electrónicos más eficientes energéticamente. Por otro lado, se pretende integrar tecnología IA (Inteligencia Artificial) para el análisis de datos y predicciones del consumo. Además, se considera la posibilidad de implementar actuadores para controlar el suministro de agua en función del análisis de datos, si este lo permite.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología CONAHCYT por su apoyo al Laboratorio Nacional de Sistemas Embebidos, Diseño Electrónico Avanzado y Microsistemas (LN-SEDEAM), proyectos números 282357, 293384, 299061, 314841, 315947 y 321128, también por la beca número 1347459.

Referencias

[1] Sammaneh, H. & Al-Yabi, M. (2019). *IoT-Enabled Adaptive Smart Water Distribution Management System*. En 2019 International Conference on Promising Electronic Technologies (ICPET) (pp. 40-44). IEEE.

[2] Mamede, H., Neves. J. C., Martins, J., Gonçalves, R. & Branco, F. (2023). *A Prototype for an Intelligent Water Management System for Household Use.* Sensors, 23(9), 4493.

[3] WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO). (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. Paris, UNESCO.

[4] Boretti, A. & Rosa, L. (2019). *Reassessing the projections of the world water development report*. NPJ Clean Water, 2(15).

[5] WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO). (2020). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y cambio climático*. UNESCO.

[6] Soares, D. (2021). *El agua en zonas rurales de México. Desafíos de la Agenda 2030.* EntreDiversidades. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades, 8(2), 191-211.

[7] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). *Programa Nacional Hídrico 2020-2024 Resumen.* Recuperado el 18 de agosto de 2024 de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/553479/PNH_Resumen_Imprenta_v200311.pdf.

[8] Gobierno del estado de Zacatecas. *PED Plan Estatal de Desarrollo 2022-2027.* Recuperado el 18 de agosto de 2024 de https://www.zacatecas.gob.mx/archivos/PED_2022-2027.pdf.

[9] Gobierno del estado de Zacatecas. *Programa Hídrico Estatal Visión 2030 Zacatecas.* Recuperado el 18 de agosto de 2024 de https://coepla.zacatecas.gob.mx/wp-content/uploads/2019/11/Programa-H%C3%ADdrico-Estatal-visi%C3%B3n-2030.pdf.

[10] JIAPAZ. *Servicio de agua potable en Zacatecas y Guadalupe*. JIAPAZ. https://jiapaz.gob.mx/tandeo-de-agua-potable-en-zacatecas-y-guadalupe/.

[11] Pimenta, N. & Chaves, P. (2021). *Study and design of a retrofitted smart water meter solution with energy harvesting integration.* Discover Internet of Things, 1, 1-15.

[12] Feng, X., Zang, D., Yan, L., Xie, W., Zhu, H., Yin, X. & Xu, M. (2021). *Design on smart water meter system based on Cloud Computing.* En E3S Web of Conferences. (Vol. 237, p. 04010). EDP Sciences.

[13] Li, X. J. & Chong, P. H. J. (2019). *Design and Implementation of a Self-Powered Smart Water Meter.* Sensors, 19(19), 4177.

[14] Di Mauro, A., Di Nardo, A., Santonastaso, G. F. & Venticinque, S. (2019). *An IoT system for monitoring and data collection of residential water end-use consumption*. En 2019 28th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN) (pp. 1-6). IEEE.

[15] Ramos, H. M., McNabola. A., López-Jiménez, P. A. & Pérez-Sánchez, M. (2019). *Smart Water Management towards Future Water Sustainable Networks.* Water, 12(1), 58.

[16] Alvisi, S., Casellato, F., Franchini, M., Govoni, M. Luciani, C., Poltronieri, F., Riberto, G., Stefanelli, C & Tortonesi, M. (2019). *Wireless Middleware Solutions for Smart Water Metering.* Sensors, 19(8), 1853.

[17] Li, J. Yang, X. & Sitzenfrei, R. (2020). *Rethinking the Framework of Smart Water System: A Review.* Water, 12(2), 412.

[18] Di Mauro, A., Di Nardo, A., Santonastaso, G. F. & Venticinque, S. (2020). *Development of an IoT System for the Generation of a Database of Residential Water End-Use Consumption Time Series.* Environmental Sciences Proceedings, 2(1).

[19] Nadipalli, L. S., Akhil, D. S., Kumar, A. A., & Ganesh, N. (2021). *Water Conservation Control by using IoT Smart Meter*. En 2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC) (pp. 448-452). IEEE.

[20] Amir, A., Fauzi, R., & Arifin, Y. (2022). *Smart water meter for automatic meter reading*. En IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1212(1), (p. 012042). IOP Publishing.

[21] Jha, M. K., Sah, R. K., Rashmitha, M. S., Sinha, R., Sujatha, B., & Suma, A. (2018). *Smart water monitoring system for real-time water quality and usage monitoring*. En 2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA) (pp. 617-621). IEEE.

[22] Raad, A. M., Alduais, N. A., Abdullah, J., Mahdin, H. B., Saad, A. M. H., Nasser, A. B., & Alduais, H. S. (2021). *An efficient IoT-based smart water meter system of Smart City environment*. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 12(8).

[23] Alrowaijeh, J. S., & Hajj, M. R. (2018). *Autonomous self-powered water meter*. Applied Physics Letters, 113(3).

[24] AtlasScientific Environmental Robotics. *½" Flow Meter datasheet.* Recuperado el 18 de agosto de 2024 de 1-2_flow_datasheet.pdf (atlas-scientific.com).

[25] García, F. (2021). *Plataforma Basada en IoT y la Nube para Almacenamiento de Datos y Control de Dispositivos Domóticos*. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Zacatecas.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 9, pp. 108 - 121.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Análisis Comparativo de Antenas Helicoidales, Apertura Piramidal y de Parche Rectangular: Diseño, Rendimiento y Aplicaciones en IoT

Viramontes Ureño Selene[1], Guerrero Osuna Héctor Alonso[1], Martínez Blanco Ma. del Rosario[1], Rodríguez Abdalá Víctor Iván [1], Castañeda Miranda Rodrigo [1] y Ornelas Vargas Gerardo [1]

[1]Posgrado en Ingeniería y Tecnología Aplicada, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas 98000, Zacatecas, México.
35164524@uaz.edu.mx

Resumen

El Internet de las Cosas (IoT) se ha convertido en parte de la vida moderna, utilizándose para la adquisición de datos y comunicaciones inalámbricas efectivas. Independientemente del perfil de aplicación del IoT, cada transmisión inalámbrica depende de antenas eficientes. Por lo tanto, la antena desempeña un papel fundamental y es importante asegurar su correcto funcionamiento. Considerando la alta demanda de aplicaciones IoT, existe una necesidad constante de mejorar las tecnologías de antenas, incluyendo nuevos diseños de antenas, para aumentar el nivel de rendimiento y mejorar su eficiencia, permitiendo una comunicación optima y baja tasa de error. En base a ello se realiza una comparativa entre tres tipos de antenas: hélice, apertura piramidal y parche rectangular, todas operando a una frecuencia de 10 GHz, permitiendo mayores anchos de banda, lo cual es crucial para soportar las crecientes necesidades de tráfico de datos, y a su vez, la frecuencia elevada reduce el tamaño de las antenas**.** *Estas antenas fueron diseñadas y simuladas utilizando el software ANSYS, un entorno de simulación electromagnética avanzado que permite evaluar el rendimiento y las características de cada antena en condiciones controladas. El objetivo de este estudio es analizar las propiedades de radiación, directividad, ganancia, y otros parámetros clave para determinar cuál de estas antenas es más adecuada para diferentes aplicaciones. Como resultado se obtuvo que la antena de hélice mostró diversas ventajas en aplicaciones que requieren polarización circular, mientras que la antena de corneta destaco por su alta directividad y ganancia, siendo ideal para sistemas de radar y comunicaciones de microondas, y la antena de parche rectangular demostró ser eficiente en términos de diseño compacto y facilidad de integración en dispositivos donde el espacio es limitado. La comparación realizada revela que, aunque cada antena tiene características específicas que las hacen adecuadas para distintas aplicaciones, la elección final dependerá del balance entre rendimiento y requisitos de diseño en la aplicación específica.*

Palabras clave: IoT**,** antenas, hélice, corneta piramidal, parche rectangular, directividad, ganancia, patrón de radiación.

1. Introducción

El creciente mercado del Internet de las Cosas (IoT) requiere varios tipos de componentes electrónicos y tecnologías de comunicación para un amplio espectro de aplicaciones, incluidas ciudades y vehículos inteligentes, automatización del hogar, telemedicina y aplicaciones industriales. Evidentemente, el funcionamiento exitoso de estas aplicaciones depende de un componente inalámbrico confiable. Entre la multitud de atención y discusiones que rodean al Internet de las Cosas (IoT), el tema del rendimiento de las antenas no siempre se considera adecuadamente. A veces, esta

falta de atención se debe a ciertas interpretaciones del IoT, en las cuales varios dispositivos de bajo costo están cerca unos de otros sin necesidad de transceptores potentes. Incluso en esos escenarios, el rendimiento de la antena sigue siendo muy importante debido a problemas como el ruido, el desvanecimiento y la necesidad de eficiencia. Por lo tanto, las antenas son un elemento esencial para el IoT [1].

Las antenas son utilizadas para conectar enlaces punto a punto, emitir y recibir señales de radio, televisión e internet, siendo estas últimas unas de las aplicaciones más comunes [2]. De modo que toda onda se caracteriza por su frecuencia (f) y su longitud de onda (λ), ambas relacionadas por la velocidad de propagación en el medio, que habitualmente en antenas tiene las propiedades del vacío ($c = 3x10^8$ m/s), con $c = \lambda * f$.

El conjunto de todas las frecuencias, o espectro de frecuencias, se divide por décadas en bandas [3]. Además, la directividad de una antena es definida como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia dada. De manera gráfica, podemos decir que una antena muy directiva tiene la capacidad de concentrar su potencia de radiación (o recepción) en una dirección específica. Esto le permite enfocar su señal hacia un punto determinado y evitar recibir señales de otras direcciones [4]. Así mismo la directividad es una magnitud que describe solo propiedades de direccionalidad de la antena, y depende únicamente del patrón de radiación. Otro parámetro importante que está directamente relacionado con la directividad es la ganancia de la antena. Es importante subrayar que tanto la directividad como la ganancia son funciones que dependen de las coordenadas esféricas teta y phi. Su definición es similar, pero la comparación no se establece con la potencia radiada, si no con la potencia entregada a la antena. La ganancia pone de manifiesto el hecho de que una antena real no radia toda la potencia que se le suministra, si no que parte de ésta se disipa en forma de calor [5].

Además de recibir o transmitir energía, una antena de un sistema inalámbrico avanzado suele tener que optimizar o acentuar la energía de radiación en algunas direcciones y suprimirla en otras. Así pues, la antena debe servir también como dispositivo direccional además de como dispositivo de sondeo. Por lo tanto, puede adoptar diversas configuraciones, como un trozo de alambre conductor, una abertura, un parche o un conjunto de elementos (matriz), siendo estas algunas de sus posibles formas. Lo cierto es que sin las antenas sería imposible la transmisión de información a través de grandes distancias en la actualidad [6], [7].

Uno de los tipos que existen son las antenas de hilo están hechas de hilos conductores y suelen ser fáciles de construir, por lo que su coste suele ser bajo. Algunos ejemplos son los dipolos [8], monopolos [9], hélices, antenas Yagi-Uda y log-periódicas. Mientras que la antena Yagi-Uda (también conocida como Yagi) es otro tipo popular de antena de tiro extremo muy utilizada en las bandas de VHF y UHF (30 MHz a 3 GHz) por su sencillez, bajo coste y ganancia relativamente alta. La aplicación más notable es para la recepción de TV doméstica y éstas se pueden encontrar en los tejados de las casas. Una configuración muy similar a la antena Yagi-Uda es la antena log-periódica. Produce un diagrama de radiación y una directividad (normalmente entre 7 y 15 dBi) similares a la Yagi-Uda y, al igual que ésta, se utiliza ampliamente en las bandas de VHF y UHF. Sin embargo, el ancho de banda de la antena log-periódica es mucho mayor que la Yagi-Uda [10].

Hay otro grupo de antenas que no están hechas de hilos metálicos, sino de placas para formar determinadas configuraciones que irradian/reciben energía electromagnética (EM) de una manera eficiente y deseada que son las antenas de tipo apertura, estas suelen utilizarse para aplicaciones de frecuencias más altas que las antenas de hilo. Algunos ejemplos típicos son las antenas de bocina y las antenas reflectoras [10]. Las antenas reflectoras y de lente pueden ofrecer ganancias significativamente mayores que las antenas de bocina, y suelen ser relativamente fáciles de diseñar y construir. Estas antenas se utilizan ampliamente en aplicaciones de alta frecuencia y ganancia, como la radioastronomía, el radar, las comunicaciones por microondas y ondas milimétricas, así como en el seguimiento y las comunicaciones por satélite. Aunque las antenas reflectoras y de lente pueden adoptar diversas configuraciones geométricas, la forma más popular es el paraboloide [11], debido a su

excelente capacidad para generar un haz en forma de lápiz (alta ganancia), con lóbulos laterales bajos y buenas características de polarización cruzada en el diagrama de radiación [12].

Por otra parte, las antenas de parche son de los dispositivos más utilizados es en el campo de la telefonía celular, debido a su tamaño y forma compacta; la quinta generación (5G) de redes móviles de telecomunicaciones traerá consigo la implantación de los dispositivos pertinentes para su conectividad a la red, siendo para ello necesario el diseño de antenas particularmente adaptadas para los mismos [13].

El diseño y simulación de antenas constituyen una actividad importante en el desarrollo de sistemas de comunicación inalámbrica. Dentro de las diversas configuraciones de antenas, las de parche, apertura píramidal y hélice destacan por sus características particulares y aplicaciones específicas cada una, así como las bandas de frecuencia en las que operan. En este artículo, se centrará en el diseño y simulación de estas tres antenas operando a 10 GHz, una frecuencia que ofrece ventajas significativas para aplicaciones IoT debido a su capacidad para proporcionar mayores anchos de banda, menor interferencia y compatibilidad con dispositivos compactos y de bajo consumo. Esto permitirá deducir cuál de ellas resulta más eficiente según su aplicación específica. El propósito es llevar a cabo una comparativa de sus desempeños respectivos para identificar la antena más adecuada para las diferentes aplicaciones [6].

2. Trabajos relacionados

Tiago et al. [14] habla sobre el Internet de las Cosas (IoT) donde menciona que implica una infinidad de dispositivos y pequeños sensores conectados, integrados en una red más grande con acceso permanente para el usuario. Una de sus principales aplicaciones es en el concepto de hogar inteligente, permitiendo mayor comodidad, eficiencia (en varios aspectos) y seguridad. Con más y más dispositivos, es hoy en día obligatorio que estos dispositivos sean pequeños, de bajo consumo y al mismo tiempo más capaces y eficientes. En este trabajo se propone una antena para dispositivos IoT, que esta desarrollada para la banda de 17 GHz y que presenta un ancho de banda alto acorde a las crecientes necesidades de las redes inalámbricas. Esta antena tiene dimensiones reducidas, lo que la hace ideal para integrarse en la mayoría de los sensores IoT.

En el trabajo presentado por Francisco [15] menciona las aplicaciones IoT y su demanda en ciertos requerimientos en cuanto a ancho de banda, frecuencia de operación, entre otros; en este sentido hoy en día existen muchos tipos de aplicaciones orientadas a IoTs, lo cual impactará en los requerimientos especificaciones de diseño de las antenas, Sin embargo, surge un requerimiento de diseño que sobresale a la hora de diseñar antenas para IoT, la miniaturización.

El Shorbagy et al. [16] En este artículo se aborda la arquitectura de antenas de ondas milimétricas (mm-wave) de las redes inalámbricas 5G. En esta sección se destacan los objetivos y necesidades de las antenas de ondas milimétricas para 5G. En este primer diseño se utiliza una antena de doble banda con ranuras en forma de parche con frecuencias de 28 GHz y 38 GHz. Una línea microstrip de alimentación única excita la antena, que está polarizada circularmente. Se utilizan antenas direccionales tanto en el transmisor como en el receptor para contrarrestar las importantes pérdidas de propagación y obtener una alta ganancia de antena.

La investigación presentada por Gao et al. [17] en la cual realizo una revisión del desarrollo reciente de antenas para diversas aplicaciones, en las cuales la cobertura esférica completa suele conseguirse combinando los diagramas de radiación de varias antenas. Las antenas típicas incluyen monopolos, parches microstrip, hélices y antenas de torniquete.

En el trabajo realizado por Sharma et al. [18] y En el artículo presentado por Bhoot et al. [19] se realiza una revisión exhaustiva sobre antenas, esto debido a las distintas geometrías para mejorar los parámetros de rendimiento de una antena. Sharma et al [18] se centra más en la fusión de distintas geometrías en una antena mientras que Bhoot et al. [19] realiza el diseño de varias antenas de distintas

geometrías; pero ambos se enfocan en los parámetros de las antenas tales como la ganancia, frecuencia, patrón de radiación y directividad.

Andreev et al. [20] realizaron su investigación experimental comparando antenas combinadas y helicoidales de banda ultra ancha, dichas antenas se optimizan para ser excitadas por pulsos de tensión bipolares de 1 ns. La adaptación de la antena al alimentador se estudia en el dominio de la frecuencia y los patrones de antena por el valor de pico del campo radiado se estudian en el dominio del tiempo para los planos E y H.

Nagalakshmi et al. [21] realizaron un estudio que se centra en el examen exhaustivo de dos diseños de antena que operan en la banda IMT-E a una frecuencia central de 2,6 GHz: la antena de lente y la antena helicoidal. Las antenas de lente del Grupo-1 tienen un grosor de lente de 0,07; las antenas de lente del Grupo-2 tienen un grosor de lente de 0,05; las antenas helicoidales del Grupo-3 tienen un rango de frecuencias de 2,2 GHz a 3,2 GHz; y las antenas helicoidales del Grupo-4 tienen un rango de frecuencias de 2,4 GHz a 2,8 GHz. En la banda IMT-E a 2,6 GHz, este estudio comparativo ofrece información reveladora sobre los parámetros de rendimiento de las antenas helicoidales y de lente.

En el trabajo que presenta Bishnu et al. [22] discuten el diseño de una antena de bocina piramidal con alta ganancia y lóbulos laterales reducidos que cubre parcialmente la banda C y la banda X de operación. La antena optimizada muestra una ganancia decente de aproximadamente 12,2 dB en el rango de operación, mientras que tiene un ancho de banda de 3 GHz centrado en la frecuencia de 7,5 GHz (aproximadamente 7 GHz a 10 GHz). El objetivo principal de este trabajo es diseñar una antena de trompeta piramidal a 7,5 GHz utilizando el software HFSS.

En el estudio de Manshari et al. [23] describen dos antenas de bocina de banda ancha que funcionan en la banda X y KU en el intervalo de 6,5-20,5 GHz. La primera antena es una simple bocina de doble cresta (antorcha de un paso) y la segunda es una novedosa bocina de antorcha de doble sección (antorcha de dos pasos). Para una mejor comparación en el diseño de las antenas, se considera la similitud de la ganancia. Las dimensiones de estas dos antenas son aproximadamente las mismas y se investigan las prestaciones de los dos diseños en términos de VSWR.

Heiman et al. [24] presentan el diseño, simulación y medida de una antena de bocina piramidal con polarización lineal, que opera en la banda Ku a 13,3 GHz. La antena de bocina está fabricada en aluminio, pesa unos 0,7 kg, el corte de cada cara de la antena se realizó con la ayuda de un control numérico por ordenador y a continuación se procedió al ensamblaje de cada cara de la antena. Las simulaciones son realizadas con ANSYS HFSS y muestran una ganancia máxima de 21,5 dB, que concuerda bien con los resultados medidos

3. Materiales y métodos

3.1 Patrón de radiación

Las formas conocidas como diagramas de radiación demuestran cuánta potencia irradian las antenas en cada dirección. Aunque el diagrama de radiación puede estar en cualquier plano, normalmente sólo se refiere a patrones horizontales o verticales. En las antenas dirigidas, el diagrama de radiación y las definiciones son las siguientes:

- Haz principal: El haz que se dirige en la dirección de radiación primaria de la antena.
- Flaps laterales: Aletas que no se desean alrededor del haz primario
- Haz: La anchura del haz a media potencia (HPBW) es también el ángulo entre los puntos cuando la intensidad del haz principal disminuye a 3 dB [25].

3.2 Bandas de frecuencias

Uno de los conceptos íntimamente ligado a las antenas es la frecuencia pues esta determina el tamaño físico de la misma [26]. Al categorizar las ondas electromagnéticas utilizando las longitudes de onda como guía, se emplea la expresión microondas para las longitudes de onda que varían en longitud entre 1 cm y 1 m. Cuando se determina la correspondencia de frecuencias adecuada utilizando la fórmula de la velocidad de la luz, las longitudes de onda son las comprendidas entre 300 MHz y 30 GHz. La tabla 1 [27] ilustra detalladamente las bandas de frecuencia del espectro electromagnético.

Tabla 1. Características de transmisión en las distintas bandas de frecuencia.

Categoría	Bandas	Capacidad	Atenuación	Cobertura	Coste equipos	Usos típicos
Baja frecuencia	VLF, LF (3-300 KHz)	Baja	Baja	Amplia	Bajo	Radionavegación, emergencias, policía, comunicaciones militares, radio
Frecuencias medias y altas	MF, HF (300 KHz-30 MHz)	Media	Media	Media	Bajo	Radio, Radioaficionados
Frecuencias muy altas	VHF, UHF (30 MHz-1GHz)	Media-Alta	Alta	Media	Medio	Televisión, radio, comunicaciones móviles
Microondas	1 GHz-30 GHz	Alta	Alta	Reducida	Alto	Comunicaciones móviles, satélite, radioenlaces, redes de datos inalámbricas
Milimétricas	30 GHz-300 GHz	Muy Alta	Muy Alta	Muy Reducida	Muy Alto	Radioastronomía, investigación

En los primeros decenios del siglo XX las frecuencias de trabajo, en las bandas de LF, MF y HF, hacían que las antenas tuvieran unas dimensiones mucho menores o comparables a la longitud de onda. En dichas bandas los circuitos se pueden considerar como de elementos concentrados. Las bandas de microondas no están claramente definidas, pero se entiende que empiezan a partir de UHF, hasta banda X. En dichas bandas las antenas son mucho mayores que la longitud de onda, y los circuitos son de elementos distribuidos, aunque en UHF pueden coexistir técnicas híbridas [28].

3.3 Directividad y Ganancia

La directividad es la propiedad que tiene una antena de transmitir o recibir la energía irradiada en una dirección particular. Para un enlace inalámbrica que utiliza antenas fijas en ambos extremos, se puede utilizar esta directividad para concentrar la radiación en la dirección deseada. En cambio, para una estación móvil y otra fija o ambas móviles, donde no se puede predecir donde va a estar una de ellas, la antena deberá radiar en todas las direcciones del plano horizontal y para ello se utiliza una antena omnidireccional [29].

La ganancia es una relación o cociente entre dos magnitudes físicas iguales (energías, potencias, tensiones, etc.), es decir un número adimensional que puede ser mayor, menor o igual a la unidad. La ganancia de una antena se expresa tomando como referencia la energía radiada de una antena estándar. Las dos referencias más comunes son la antena isotrópica y la antena dipolo resonante de media longitud de onda. La antena isotrópica irradia en todas las direcciones con la misma intensidad. Esta antena no existe, pero sirve como patrón técnico sencillo con el que se comparan las antenas reales ya que cualquier antena real va a irradiar más energía en algunas direcciones que en otras [29].

3.4 Comparativa de antenas

Para comenzar, es importante destacar las antenas de alambre, las cuales presentan diversas configuraciones. Entre ellas, se encuentra la antena helicoidal, cuya estructura se ilustra en la figura 1 [6]. La antena helicoidal fue inventada en 1946 por John Kraus en la Universidad Estatal de Ohio, la cual consiste en un conductor o varios conductores (bifilares, cuadrifilares o multifilares) enrollados en forma de hélice que se conectan a una placa de tierra con una línea de alimentación [30]. Esta antena produce una polarización circular que sigue el sentido de enrollamiento de la hélice y mantiene una impedancia de punto de alimentación bastante constante. El aumento de la separación entre las espiras y la circunferencia de la hélice y el número de espiras aumentará la directividad de la antena. La impedancia del punto de alimentación también es sensible a la separación entre espiras y a la circunferencia, aumentando generalmente a medida que aumentan estas dimensiones [31].

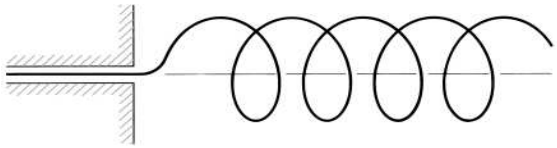


Figura 1. Antena Helicoidal [6].

La antena helicoidal es una estructura muy simple que posee varias propiedades interesantes en las que incluyen un gran ancho de banda, alta ganancia y polarización circular (circular derecha o circular izquierda) dependiendo la orientación que este enrollada la hélice, la polarización circular, propia de esta antena, tiene la ventaja de ser poco sensible a los fenómenos atmosféricos [30], [32].

Este tipo de antena es de muy común utilización en comunicaciones y actualmente es muy difundida entre los radioaficionados. Presenta la ventaja de que es fácil de fabricar a muy bajo costo y, además, en base a este diseñó es relativamente fácil fabricar antenas con ganancias diferentes ya que se aumenta la ganancia simplemente aumentando el número de espiras (aunque la relación no es lineal) [32].

Con respecto a las antenas de apertura, en sus diversas formas como lo son las de apertura piramidal (ver figura 2), son conocidas por permitir una transición eficaz de la propagación guiada a la propagación en el espacio libre. En la actualidad se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones [33].

Una de las antenas de microondas más sencillas y probablemente la más utilizada es la bocina. Su existencia y uso se remontan a finales del siglo XIX. Aunque se descuidó un poco a principios del siglo XX, su resurgimiento comenzó a finales de la década de 1930 a partir del interés por las microondas y las líneas de transmisión de guía de ondas durante el periodo de la Segunda Guerra Mundial [6]. Entre las bocinas de microondas, la bocina rectangular es la más sencilla y fiable. Se trata de un tubo hueco de sección transversal rectangular que se ensancha hacia una abertura mayor en la dirección del plano E o H (bocina sectorial) o en ambas direcciones (bocina piramidal). Las bocinas rectangulares son herramientas útiles en ciencia e ingeniería por su sencillez de construcción, facilidad de excitación, versatilidad y alta ganancia [34].

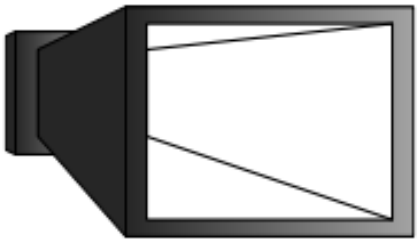


Figura 2. Antena de Apertura Piramidal [33].

Una expresión clásica para la ganancia de una bocina piramidal es la fórmula de Schelkunoff. Esta fórmula calcula la ganancia de campo lejano en el eje de la bocina como el producto de la directividad de un modo dominante uniforme guía de onda rectangular sin llamaradas y la reducción de ganancia debido a la amplitud y la fase de conicidad a través de la apertura de la bocina [35]. Sus principales suposiciones son que la bocina opera en el modo dominante de la guía de onda TE10 y que está bien acoplada a la guía de onda de alimentación; además, desprecia la contribución de las corrientes de franja causadas por la discontinuidad de la apertura y la interacción mutua entre los bordes de la apertura [36].

En cuanto a Las antenas de microstrip recibieron una atención considerable a partir de la década de 1970, aunque la idea de una antena de microstrip se remonta a 1953 [37]. Una antena de parche (también conocida como microantena de tira rectangular) es un tipo de antena de radio con un perfil bajo, que puede construirse sobre una superficie plana. Consiste en una lámina metálica rectangular plana o ”parche” de metal, montada sobre una lámina metálica mayor llamada plano de tierra como se muestra en la figura 8 [38].

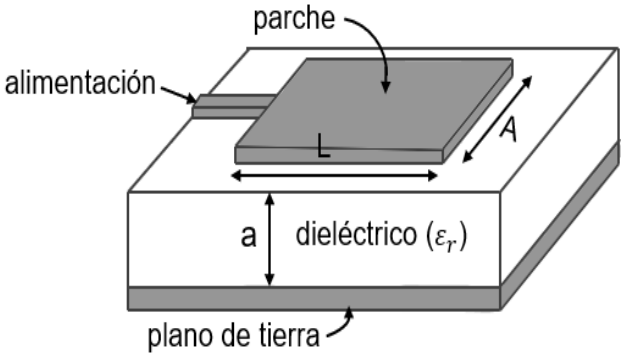


Figura 3. Antena de Parche [39].

El parche rectangular es, con diferencia, la configuración más utilizada. Es muy fácil de analizar utilizando tanto el modelo de línea de transmisión como el de cavidad, que son los más precisos para sustratos delgados [40].

3.5 Simulador Ansys Electronics HFSS

Una de las herramientas más utilizadas en la ingeniería, es el software de simulación por computadora. Estas herramientas digitales están destinas para simular y analizar distintos objetos o problemas para determinar un resultado o llegar a una conclusión. Los softwares de simulación por computadora son herramientas muy versátiles, esto es gracias a la capacidad actual de los ordenadores modernos [41].

Ansys HFSS es un software de simulación electromagnética (EM) 3D para diseñar y simular productos electrónicos de alta frecuencia como antenas, conjuntos de antenas, componentes de RF o microondas, interconexiones de alta velocidad, filtros, conectores, paquetes de circuitos integrados y placas de circuito impreso. Ingenieros de todo el mundo utilizan el software Ansys HFSS para diseñar componentes electrónicos de alta frecuencia y velocidad que se encuentran en sistemas de comunicaciones, sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS), satélites y productos de Internet de las cosas (IoT) [41].

En el campo de las telecomunicaciones, HFSS es un software utilizado habitualmente para el análisis de parámetros como el coeficiente de reflexión, la impedancia de entrada y la ganancia. Sin embargo, a pesar de los excelentes resultados obtenidos en comparación con el análisis experimental, el proceso de optimización es todo un reto [42].

4. Resultados

4.1 Simulaciones

En este apartado se describen las simulaciones realizadas en ansys HFSS de las 3 antenas.
Se realizaron simulaciones detalladas de tres tipos de antenas: parche, apertura piramidal y hélice, utilizando un software especializado de diseño y simulación de antenas (Ansys Electronics HFSS). Cada antena fue modelada y analizada en términos de parámetros clave como la ganancia, directividad y el patrón de radiación. En primera instancia, se diseñó una antena de hélice con dos vueltas, como se ilustra en la Figura 4. Los ángulos de inclinación de la hélice (pitch antenna) se encuentran en un rango de 12 a 14 grados; en este diseño específico, se ha seleccionado un ángulo de paso de 13 grados, operando a una frecuencia de 10 GHz. La antena está montada sobre un plano de tierra de forma circular, lo que le otorga una polarización circular y una directividad muy elevada.

La antena de hélice, conocida por su polarización circular, fue evaluada en términos de su capacidad para mantener una directividad constante y alta eficiencia en aplicaciones de comunicaciones. Esta antena es especialmente útil en escenarios donde la orientación de la antena receptora puede variar, lo que hace que la polarización circular sea una característica deseable. Los resultados de la simulación muestran que la antena de hélice proporciona una buena directividad y estabilidad en la polarización.

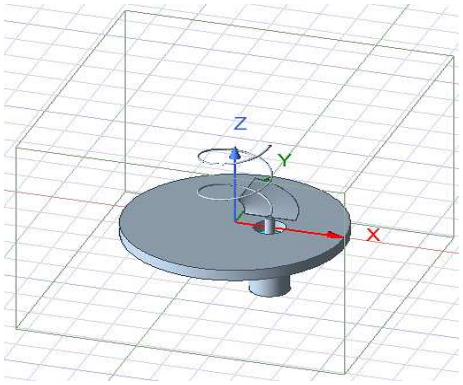


Figura 4. Antena de hélice.

Para la hélice de este mismo ejemplo, el patrón se muestra en la figura 5, en el cual podemos observar que es altamente directivo lo que significa que la mayoría de la energía radiada está enfocada en una dirección específica (a lo largo del eje principal de la hélice).

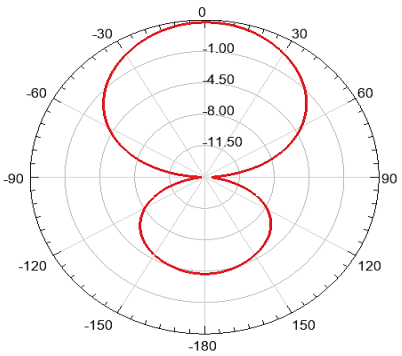


Figura 5. Patrón de radiación 2D de antena de hélice.

En segundo lugar, se desarrolló una simulación de una antena de apertura piramidal (ver figura 6), la cual es reconocida por su alta directividad y eficiencia. con respecto al análisis se incluyó la evaluación de su ganancia, directividad y frecuencia.

La antena de corneta es reconocida por su capacidad de enfocar la energía radiada en un haz estrecho, lo que resulta en una mayor ganancia y menor pérdida de señal en aplicaciones donde la precisión y el alcance son críticos. Las simulaciones realizadas en ANSYS revelan que la antena de corneta logra un rendimiento superior en términos de directividad y ganancia comparada con la antena de hélice y la antena de parche, lo que confirma su idoneidad para aplicaciones de radar y sistemas de detección a distancia.

En la parte de diseño y simulación de antenas, un puerto se refiere al punto de conexión donde la energía electromagnética es introducida o extraída de la antena. En la figura 6 se puede observar en el recuadro rojo el puerto de alimentación de nuestra antena de apertura piramidal diseñada, así como la excitación de la antena la cual se refiere al proceso que se realiza para suministrar energía de radiofrecuencia (RF) a la antena para que así pueda emitir ondas electromagnéticas, este apartado se señala con el recuadro rojo en la imagen.

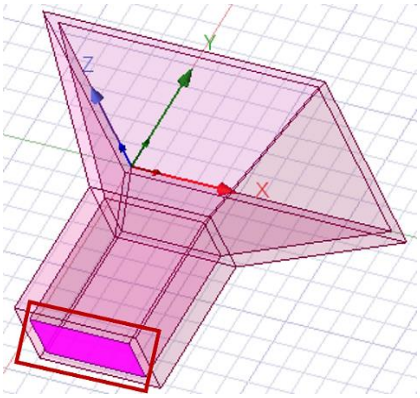


Figura 6. Puerto y excitación de antena de corneta piramidal.

El patrón de radiación de una antena es muy importante para entender cómo una antena emite señales en diferentes direcciones. En la figura 7 podemos observar el patrón de radiación de la antena de apertura piramidal; la figura muestra la dirección de radiación de los lóbulos, así como la ganancia obtenida como se observa en el recuadro rojo.

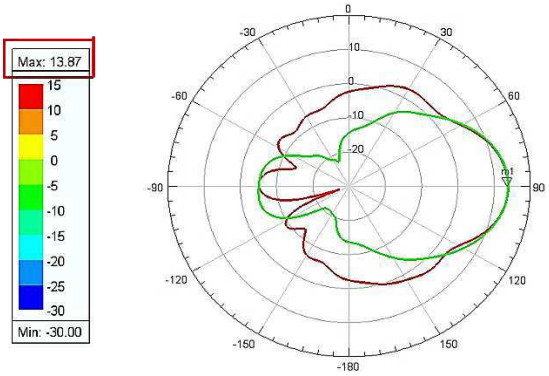


Figura 7. Patrón de radiación 2D de antena de corneta piramidal.

En tercer lugar, se diseñó una antena de parche rectangular, como se muestra en la Figura 8. Este tipo de antenas se caracteriza por ser planas, compactas y de fácil fabricación mediante técnicas de circuito impreso (PCB). En la figura, se puede observar que la antena está montada sobre un sustrato de color verde. El parche, de color morado, está alimentado por una línea de microcinta, la cual se conecta a un puerto que se encuentra señalado en un recuadro rojo en la imagen. Además, el parche presenta dos ranuras simétricas que contribuyen a mejorar el rendimiento en frecuencia de la antena.

Esta antena es especialmente adecuada para dispositivos portátiles, como teléfonos móviles, tabletas, y sistemas de comunicación de corto alcance debido a su facilidad de fabricación y bajo coste. A pesar de tener una ganancia y directividad menores en comparación con las antenas de hélice y corneta, la antena de parche ofrece ventajas significativas en términos de adaptabilidad y facilidad de integración en sistemas donde el tamaño y el peso son críticos. Las simulaciones muestran que, aunque su eficiencia puede ser inferior en comparación con las otras dos antenas, su versatilidad y bajo perfil la hacen una opción preferida en dispositivos compactos.

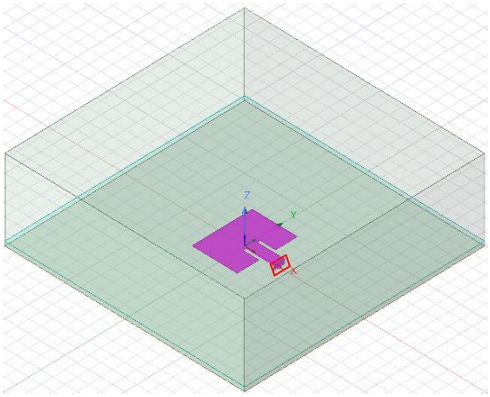


Figura 8. Antena de parche.

El patrón de radiación se representa en un diagrama polar 2D (ver figura 9) en el cual se muestra la dirección de radiación de la antena con cada uno de los lóbulos presentes.

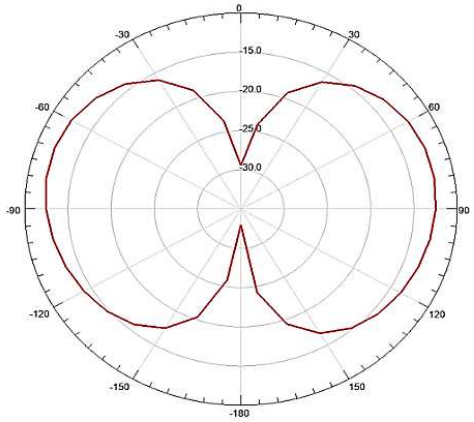


Figura 9. Patrón de radiación 2D de antena de parche.

4.2 Tabla comparativa del rendimiento de las antenas

La siguiente sección proporciona una visión detallada de la comparativa entre las antenas diseñadas y simuladas previamente. Los parámetros evaluados incluyen ganancia, directividad, patrón de radiación y frecuencia operativa. Estos resultados permiten evaluar cuál de las antenas es más adecuada para diversas aplicaciones según sus características específicas.

Tabla 2. Comparativa de antenas.

Parámetros	Antena de hélice	Antena de corneta piramidal	Antena de parche rectangular
Ganancia (dB)	7.78	13.87	12.09
Directividad (dB)	8	13	12.08
Frecuencia (GHz)	10	10	10

5. Conclusiones

Las antenas en IoT son componentes esenciales que no solo facilitan la conectividad de dispositivos, sino que también impulsan el desarrollo de soluciones más inteligentes, eficientes y sostenibles para aplicaciones actuales y futuras en diversos sectores, incluyendo hogares inteligentes, salud, industria y ciudades conectadas.

En la comparativa de las tres antenas evaluadas, se observaron diferencias significativas en términos de directividad y ganancia para diferentes aplicaciones. La antena de hélice demostró una ganancia promedio de 7.78 dB, siendo más apropiada para entornos donde la alta ganancia no es crítica. En comparación, la Antena de corneta piramidal ofreció una ganancia superior de 13.87 dB, con un patrón de radiación más direccional, ideal para aplicaciones que demandan alta precisión y concentración del haz, como en sistemas de comunicación punto a punto. mientras que, la antena de parche rectangular tiene una ganancia similar (12.09 dB) a la antena de corneta.

Con respecto a la directividad la antena de corneta piramidal mostró la mayor directividad (13 dB), lo que la convierte en la mejor opción para aplicaciones donde se requiere enfocar la señal en una dirección específica, como en sistemas de comunicación punto a punto o en escenarios que demandan alta precisión de cobertura. La antena de hélice presentó una directividad intermedia (8 dB), siendo adecuada para aplicaciones que necesitan un equilibrio entre cobertura amplia y concentración de señal. Por otro lado, la antena parche mostró una directividad (12.8 dB), lo que sugiere que también es adecuada para aplicaciones donde se requiera precisión (directividad).

Al realizar la comparativa entre antenas de hélice, apertura piramidal y parche rectangular, se concluye que cada una de estas antenas tiene características específicas, así como ventajas especificas las cuales hacen que puedan ser usadas en las diferentes aplicaciones, todo esto depende de que parámetros de antena se esté buscando mejorar u obtener un rendimiento mayor.

La antena de hélice se caracteriza por su alta eficiencia, atribuida a su polarización circular, lo cual contribuye a mantener una directividad favorable. Estas propiedades la hacen particularmente adecuada para aplicaciones en comunicaciones satelitales. En contraste, la antena de corneta destaca por su elevada ganancia y excelente directividad, características que la convierten en una opción óptima para su empleo en sistemas de radar. Por último, las antenas de parche rectangular presentan ventajas significativas en cuanto a su fabricación, dado su diseño compacto y plano. Estas cualidades las hacen idóneas para aplicaciones móviles y otras en las que el espacio disponible es un factor limitante.

Al realizar una comparativa de diferentes tipos de antenas es una práctica innovadora debido a que no solo mejora la comprensión de las capacidades y limitaciones de cada diseño, sino que también impulsa el avance en la tecnología de antenas, optimizando el rendimiento y adaptabilidad en diversas aplicaciones de comunicación inalámbrica.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología CONAHCYT por su apoyo al Laboratorio Nacional de Sistemas Embebidos, Diseño Electrónico Avanzado y Microsistemas (LN-SEDEAM), proyectos números 282357, 293384, 299061, 314841, 315947 y 321128, también por la beca número 1345438}

Referencias

[1] R. Y. Aldosari, "*Antennas for Internet of Things (IOT Antennas),*" 2021.

[2] A. R. Ponce Antinori, "*Localización ´optima de antenas para una empresa de telecomunicaciones en el Callao*," 2011

[3] A. C. Aznar, J. R. Robert, J. M. R. Casals, L. J. Roca, S. B. Boris y M. F. Bataller, Antenas. Univ. Politéc. de Catalunya, 2004.

[4] A. F. Garzón Sánchez e I. M. Ochoa Salamanca, "*Diseño e implementación de software con interfaz gráfica para la medición de los parámetros de antenas en el laboratorio de antenas de la Universidad Santo Tomás,*" Tesis doct., Universidad Santo Tomás, 2016.

[5] J. Anguera y A. Pérez, "*TEORÍA DE ANTENAS,*" https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/53462337/Teoria-Antenas-by-JaumeAnguera−libre.pdf, 2008.

[6] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2016.

[7] J. López, I. Díaz y A. Sevilla, "*Introducción al análisis y diseño de antenas,*" Revista de la Escuela de Física, vol. 2, n.o 2, págs. 82-98, 2014.

[8] S. X. Ta, I. Park y R. W. Ziolkowski, "*Crossed dipole antennas: A review,*" IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 57, n.o 5, págs. 107-122, 2015.

[9] S. Shah, M. Khan, S. Ullah, A. Basir, U. Ali y U. Naeem, "*Design and measurement of planar monopole antennas for multi-band wireless applications,*" IETE Journal of Research, vol. 63, n.o 2, págs. 194-204, 2017.

[10] Y. Huang, *Antennas: from theory to practice*. John Wiley & Sons, 2021.

[11] P. Dhande, "*Antennas and its Applications*," DRDO Science Spectrum, págs. 66-78, 2009.

[12] A. W. Love, "*Reminiscences of a career in electrical engineering [From the Historian],"* IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter, vol. 31, n.o 5, págs. 16-25, 1989. doi: 10.1109/MAP.1989.6102063.

[13] N. Gualda Fernández, "*Antenas para dispositivos móviles 5G e IoT*," 2019.

[14] T. Varum, M. Duarte, J. N. Matos y P. Pinho, "Microstrip antenna for IoT/WLAN applications in smart homes at 17GHz," en 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018), 2018, págs. 1-4. doi: 10.1049/cp.2018.0475.

[15] J. F. Estrada Cortez et al., "Retos en el diseño de antenas para aplicaciones IOT.," 2023.

[16] M. El Shorbagy, R. M. Shubair, M. I. AlHajri y N. K. Mallat, "On the design of millimetre-wave antennas for 5G," en 2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), IEEE, 2016, p´ags. 1-4.

[17] S. Gao, Y. Rahmat-Samii, R. E. Hodges y X.-X. Yang, "*Advanced Antennas for Small Satellites*," Proceedings of the IEEE, vol. 106, n.o 3, págs. 391-403, 2018. doi: 10.1109/JPROC.2018.2804664.

[18] N. Sharma y S. S. Bhatia, "*Comparative analysis of hybrid fractal antennas: A review*," International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, vol. 31, n.o 9, e22762, 2021.

[19] A. A. Bhoot, S. A. Memon, A. Ahmed y S. Hussain, "*Comparative Study of Microstrip Patch Antenna with Different Shapes and its Application*," en 2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET), 2019, págs. 1-8. doi: 10.1109/ICOMET.2019.8673487.

[20] Y. A. Andreev, S. S. Smirnov, K. V. Zavyalova, Y. Xie e Y. Qiu, "*Comparison of the effective potentials of ultrawideband combined and helical antennas,"* Russian Physics Journal, vol. 63, págs. 250-257, 2020.

[21] T. Nagalakshmi y G. Revanth, "*Performance Metrics Comparison in IMT-E Band between Lens Antenna and Helical Antenna at 2.6 GHz – A Statistical Approach*," en 2024 Fourth International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT), 2024, págs. 1-6. doi: 10.1109/ICAECT60202.2024.10469638.

[22] S. K. Bishnu, S. Ray y M. Gangopadhyay, "*Design of Pyramidal Horn Antenna at 7.5 GHz by using different Optimization Techniques*," en 2020 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS), 2020, págs. 1-3. doi:10.1109/IEMTRONICS51293.2020.9216364.

[23] S. Manshari, F. Hojjat-Kashani, g. Moradi y M. Sarijlo, "*The comparison of two structures of wide band horn antenna,"* International Journal of Electronics Letters, vol. 7, n.o 1, págs. 95-106, 2019.

[24] A. Heiman y A. Badescu, "*Analysis of Pyramidal Horn Antenna for Ku Band Applications*," en 2021 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2021, págs. 1-2. doi: 10.23919/ISAP47258.2021.9614429.

[25] S. KARAHAN y A. A. ULUSLU, "*COMPARISON OF HORN ANTENNA DESIGNS WITH DIFERENT SHAPES FOR GAIN MEASUREMENT AND CALIBRATION SYSTEMS*," Current Research in Engineering, pág. 137, 2023.

[26] J. Anguera y A. Andújar, *Antenas: Elementos Indispensables de las Telecomunicaciones*, 2018.

[27] F. J. Zucker y R. C. Johnson, "*Surface-wave antennas,*" Antenna engineering handbook, vol. 4, 2007.

[28] J. S. Sáenz Medina, "*Definición, diseño y simulación de antena fractal monopolo de Sierpinski,*" 2009.

[29] E. Monachesi, A. M. Frenzel, G. Chaile, C. Agustín y F. A. G. López, "*Conceptos generales de Antenas,*" Recuperado de: http://www. edutecne. utn. edu. ar/wlan frt/antenas. pdf, pág. 20, 2011.

[30] E. O. A. Gomez, "*Diseño de una antena helicoidal miniaturizada con estructuras de meandros,*" https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/1962, 2019.

[31] B. Slade, "*The basics of quadrifilar helix antennas,*" Orban Microwave Inc., Orlando, FL, USA, 2015.

[32] H. Durney, J.-Y. Gautier y F. Ulloa, "*Análisis, Diseño, Construcción y Medición de Antenas Helicoidales para 2.4 GHz sobre Aeroplataforma de Comunicaciones Globo-Antena (HAPS).,*" Línea de investigación HAPS. Universidad Metropolitana de Tecnología". ¡http://www.haps.cl/documentos/05.pdf ¿. (15/08/2009), 2007.

[33] P. A. G. Soares, "*Antenas Cornetas para o satélite CosmoGal*," Tesis doct., Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.

[34] K. B. Baltzis, "*Polynomial-based evaluation of the impact of aperture phase taper on the gain of rectangular horns*," Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, vol. 2010, 2010.

[35] E. J. Rothwell y M. J. Cloud, *Electromagnetics*. CRC press, 2018.

[36] J. L. Teo y K. T. Selvan, "*On the optimum pyramidal-horn design methods*," International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering: Co-sponsored by the Center for Advanced Manufacturing and Packaging of Microwave, Optical, and Digital Electronics (CAMPmode) at the University of Colorado at Boulder, vol. 16, n.o 6, págs. 561-564, 2006.

[37] G. A. Deschamps, "*Microstrip microwave antennas,*" en Proceedings of the Third Symposium on the USAF Antenna Research and Development Program, Oct, 1953, págs. 18-22.

[38] A. Bath, A. Thakur, J. Sharma y B. Prasad, "*Design of a rectangular patch antenna,*" IJEEE, vol. 1, n.o 1, 2014.

[39] H. M. Marhoon, H. A. Abdulnabi e Y. Y. Al-Aboosi, "*Designing and Analysing of a Modified Rectangular Microstrip Patch Antenna for Microwave Applications.,"* J. Commun., vol. 17, n.o 8, págs. 668-674, 2022.

[40] D. Schaubert, D. Pozar y A. Adrian, "*Effect of microstrip antenna substrate thickness and permitivity: comparison of theories with experiment,"* IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 37, n.o 6, págs. 677-682, 1989. doi: 10.1109/8.29353.

[41] J. F. Herrera Rodríguez, "*Propuesta para la creación del curso de Laboratorio de Radiocomunicaciones Terrestres, enfocado al diseño y simulación de antenas microstrip de parche rectangular y circular, en la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala*," Tesis doct., Universidad de San Carlos de Guatemala, 2023.

[42] M. F. Pagni, "*Integrac˜ao de Python com HFSS para dispositivos de microondas*," https://repositorio.unesp.br/server/9aed-4683-ba35-dfe1a0c2e641/content, 2023.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 10, pp. 122 - 138.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Medidor de Nivel de Agua en Contenedores, Aplicando Internet de las Cosas (IoT)

Chávez Flores Iván Neftalí, Guerrero Osuna Héctor Alonso, García Vázquez Fabián, Díaz Flórez Germán, Solís Sánchez Luis Octavio y Olvera Olvera Carlos Alberto

Posgrado en Ingeniería y Tecnología Aplicada, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas 98000, Zacatecas, México
39204662@uaz.edu.mx

Resumen

El consumo de agua en el ámbito doméstico es un problema que ha empeorado considerablemente. En promedio, una persona utiliza hasta 150 litros de agua al día. Si a esto se suma la escasez de agua, la situación se agrava aún más. Además, se estima que el 25% del agua suministrada a los hogares en México se pierde debido a fugas en las tuberías, lo que significa que no toda el agua llega a su destino final. Este trabajo presenta el diseño, desarrollo e implementación de un medidor de nivel de agua para contenedores, utilizando tecnologías de Internet de las Cosas (IoT). El sistema está compuesto por un ESP32, un sensor láser y Microsoft Azure. El sensor láser mide la distancia entre el nivel del agua y el sensor, y el ESP32 convierte esta distancia en litros. Las mediciones se realizan cada 15 minutos; el sistema toma un promedio de 10 muestras para obtener una lectura precisa, que luego se envía al servidor en la nube de Azure. Los datos se visualizan en un dashboard a través de Node-RED. El sensor tiene un margen de error de ±2 cm, lo cual es preciso, considerando que cada centímetro equivale a 15 litros en un contenedor de 600 litros. Además, se monitoreó el consumo de agua doméstico y se registraron los datos en una bitácora durante 4 meses. Este seguimiento permitió evaluar cómo el sistema puede proporcionar información precisa y en tiempo real sobre el nivel de agua, facilitando una gestión más eficiente de los recursos hídricos en el hogar.

Palabras clave: Internet de las cosas, Dispositivos IoT, Medición de agua inteligente, Domótica, Computación en la nube.

1. Introducción

El estado de Zacatecas se encuentra en una situación crítica debido a la combinación de factores que afectan su suministro de agua. La actividad minera e industrial ha contribuido significativamente a la escasez de agua, agravada por una precipitación media anual de tan solo 450 mm y la contaminación de las fuentes superficiales [1]. De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos más reciente, realizado en el año 2017, en el acuífero de Calera, el volumen de extracción conjunta asciende a 176.5 hectómetros cúbicos (hm^3) anuales, de los cuales 159.2 hm^3 (90.2%) se destinan al uso agrícola, 11.1 hm^3 (6.3%) al abastecimiento de agua potable, 1.1 hm^3 (0.6%) para usos pecuarios y domésticos, y 5.1 hm^3 (2.9%) para uso industrial [2].

El manto acuífero de Calera tiene la mejor calidad de agua en la región; por lo tanto, esta agua es la más codiciada de la zona. Con la llegada del grupo Modelo a Calera, Zacatecas, en 1997, el problema se agravó. Según los estudios técnicos llevados a cabo por la Comisión Nacional del Agua

(CONAGUA) en 1992, la recarga natural de Calera es de 83.9 millones de metros cúbicos al año (mm³/año), mientras que en ese entonces se extraían 125 mm³/año. Este desfase revela un gran déficit en la disponibilidad de agua [1, 3].

La escasez de agua en el estado de Zacatecas se refleja principalmente en la insuficiencia del recurso hídrico disponible en los tres mantos acuíferos antes mencionados: Calera, Guadalupe-Bañuelos y Benito Juárez. La cantidad de agua disponible es insuficiente para abastecer la demanda para diversos usos, como el doméstico, pecuario y agrícola [2]. Además, una diputada local denunció que la Junta Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado de Zacatecas (JIAPAZ) incumplió la Norma Oficial Mexicana "NOM-012-SCFI-1994", relacionada con el uso de medidores en los hogares [3].

La denuncia apuntaba a que los medidores instalados por JIAPAZ generan mediciones imprecisas, resultando en cobros superiores al consumo real de agua potable en las viviendas, lo que afecta directamente la economía de los consumidores [4]. La escasez de agua impacta a 400,000 habitantes en Zacatecas, lo que representa aproximadamente el 24% de la población total del estado. JIAPAZ suministra agua generalmente 3 días a la semana, y una vez por semana en ciertos sectores. Esto afecta directamente a la población al desconocer el nivel de agua en sus contenedores, alterando su rutina diaria [2].

El consumo de agua en los hogares se mide principalmente a través de medidores de agua, dispositivos diseñados para registrar la cantidad de agua que fluye a través de las tuberías. Existen varios tipos de medidores de agua, siendo los más comunes los siguientes [5, 6]:

- Medidores de chorro múltiple
- Medidores de disco giratorio
- Medidores de desplazamiento positivo
- Medidores ultrasónicos

Los medidores de agua más modernos pueden ser inteligentes y están conectados a sistemas de monitoreo remoto. Estos medidores utilizan tecnologías como IoT para enviar lecturas de consumo de agua de manera automática a las empresas de servicios públicos o a los propietarios de viviendas. Esto permite un seguimiento en tiempo real del consumo de agua y una detección más rápida de posibles fugas o problemas en la red de suministro. Aunque los medidores de agua son una herramienta crucial para medir y controlar el consumo de agua en los hogares, no están exentos de problemas y posibles fallas. Por otro lado, los medidores de agua inteligentes ofrecen varias ventajas sobre los medidores tradicionales. Algunas de estas ventajas incluyen [7, 8]:

- Monitoreo remoto
- Mayor precisión
- Análisis de datos
- Alertas y notificaciones

Diversos estudios e investigaciones han explorado el potencial de los medidores de nivel de agua basados en IoT, evaluando su capacidad para optimizar el uso del agua y resolver problemas asociados con el monitoreo tradicional. Estas investigaciones han analizado cómo las tecnologías emergentes pueden aprovechar las ventajas de los medidores inteligentes para mejorar la precisión de las lecturas, facilitar el monitoreo remoto y proporcionar datos analíticos valiosos.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un sistema de medición del nivel de agua aplicando tecnología de Internet de las Cosas, que obtenga lecturas cada 15 minutos y permita al usuario conocer el consumo doméstico de agua, así como notificarle en caso de que su contenedor se esté vaciando o llenando.

Las principales contribuciones de este trabajo incluyen:

- Un sistema capaz de medir la cantidad de agua en un contenedor doméstico.
- La implementación de notificaciones vía Telegram para mantener al usuario informado sobre el nivel de agua restante en su contenedor, ayudándole a ser consciente de su consumo.
- Se llevó a cabo un estudio sobre cómo la humedad generada en un contenedor de agua doméstico afecta las mediciones del sensor, logrando desarrollar una unidad de filtrado eficiente para drenar la acumulación de agua en el sensor.
- Para evaluar la precisión de las mediciones, se monitoreó el consumo de agua doméstico y se registraron los datos en una bitácora durante 4 meses, considerando actividades como duchas, descargas al inodoro y cargas de la lavadora.

El documento está organizado de la siguiente manera: en el capítulo 2 se encuentran los trabajos relacionados con esta investigación; en el capítulo 3 se describen los materiales y métodos necesarios para el desarrollo y correcto funcionamiento del sistema; en el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos en la investigación, basados en los métodos aplicados; y en el capítulo 5 se exponen las conclusiones de la investigación.

2. Trabajos relacionados

A continuación, se presentan algunas investigaciones en este campo, que demuestran cómo la aplicación de IoT en medidores de agua puede transformar la gestión de los recursos hídricos y ofrecer soluciones innovadoras para los desafíos actuales en la infraestructura del agua.

La investigación de Fuentes-Henry et al. [9] presenta un sistema de medición de consumo de agua inteligente que utiliza un diseño arquitectónico avanzado para integrar varias tecnologías y permitir la visualización en tiempo real del consumo. Utilizan un algoritmo de detección de fugas que se basa en reglas, contexto histórico y ubicación del usuario, cubriendo 10 escenarios de consumo de agua. Los datos se recogen mediante un medidor inteligente, se preprocesan en un servidor local y se envían a la Nube para su análisis, con resultados que demuestran una precisión del 100% en la detección de fugas y un margen de error del 4.63% en el consumo de agua.

En el trabajo presentado por Olisa-Samuel et al. [10] se describe el desarrollo de una aplicación móvil integrada para Android y un sistema de control diseñado para evaluar la calidad del agua, verificar el nivel en un tanque elevado y activar un control de bombeo inteligente. Se utilizó una técnica de pulso-eco ultrasónico para la verificación del nivel de agua. El error relativo absoluto entre el tiempo esperado y el tiempo del sistema para llenar el tanque fue menor al 10% cuando el volumen de agua era inferior al 81%. Se observó que una mala conexión a Internet afectaba el monitoreo en tiempo real y la automatización del control del sistema, causando retrasos en la respuesta a los comandos. Sin embargo, el tiempo promedio de respuesta del sistema es de 3 segundos, y podría ser menor con una buena calidad de red.

En el artículo de Perumal-Thinagaran et al. [11], se propone un sistema de monitoreo de agua basado en IoT que mide el nivel del agua en tiempo real. El prototipo se fundamenta en la idea de que el nivel del agua es un parámetro crucial en áreas propensas a inundaciones. Se utiliza un sensor de nivel de agua para detectar el parámetro deseado; si el nivel de agua alcanza el umbral predefinido, se envía una señal en tiempo real a redes sociales como Twitter. Se configuró un servidor en la nube como repositorio de datos, y las mediciones de los niveles de agua se muestran en un panel de control remoto.

En la investigación de Aritra-Ray et al. [12], se propone un sistema de medición de nivel de agua aplicando IoT y computación en la nube para almacenar y procesar los datos. Utilizando un sensor de flujo, su objetivo principal es detectar el consumo excesivo en la India, pues según sus estudios el 27% del agua se utiliza en el inodoro y en bañarse, anudado a esto, calculan que se desperdician

4,000 gotas, lo que representa 1 litro de agua en un periodo de tiempo corto y al día una persona gasta el 30% de agua por encima del promedio.

En el trabajo de León-Rolando et al. [13] se explora la aplicación de la tecnología IoT en sistemas de distribución de agua potable con el objetivo de mejorar la eficiencia en el control de la red de distribución. La tecnología IoT, integrada en el módulo ESP32, un sensor de flujo y una válvula de cierre YF-S201, permite el monitoreo y control remoto del suministro de agua. Además, los usuarios pueden interactuar con un bot de Telegram desde su celular para consultar sobre su consumo en cualquier momento y recibir notificaciones diarias o mensuales sobre su consumo de agua.

3. Materiales y métodos

La arquitectura propuesta para la plataforma se basa en el patrón de comunicación de dispositivo a la nube (D2C, por sus siglas en inglés, Device to Cloud), ya que el dispositivo IoT incorpora tecnología Wi-Fi que le permite enviar información a la nube. Esta arquitectura consta de cuatro dominios funcionales: capa sensórica, capa de conectividad, capa de análisis y procesado, y capa de aplicación.

Cada uno de los elementos que integran la arquitectura posee características específicas necesarias para el funcionamiento óptimo del sistema. En la Figura 1 se presenta un esquema general de la arquitectura propuesta, así como la relación e integración entre los diferentes componentes.

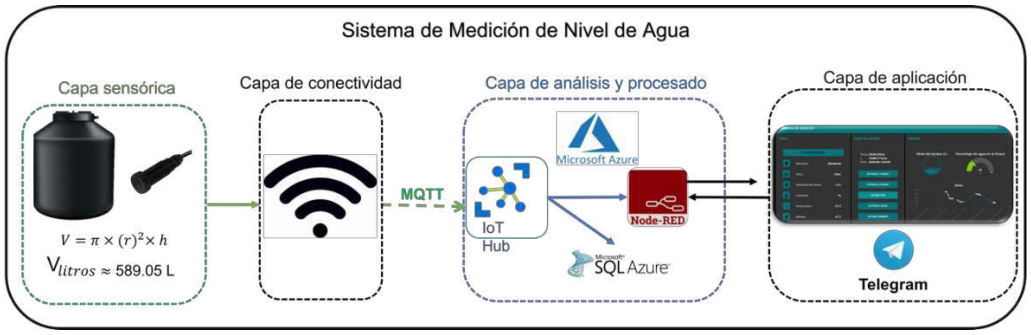


Figura 1: Arquitectura propuesta del sistema de medición.

A continuación, se describen cada uno de los elementos que componen la arquitectura.

3.1 Capa sensórica

La capa sensórica se compone de tres elementos principales; microcontrolador, sensor láser, y la capa de comunicación Wi-Fi. Los elementos mencionados se describen en secciones subsecuentes y se muestran en la Figura 2.

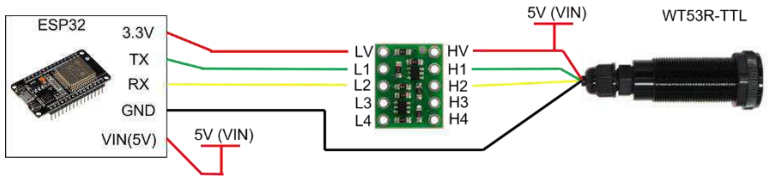


Figura 2: Diagrama de conexiones de dispositivo de borde.

Se implementó un sensor con transducción óptica que para este estudio, permite obtener la distancia existente entre el sensor y el nivel de agua. Los parámetros del sensor WT53R-TTL se muestran a continuación en la Tabla 3.1. El sensor cuenta con una interfaz de comunicación serial por medio de la cual se puede extraer la información de distancia que el sensor detecta.

Tabla 1. Parámetros del sensor láser WT53R-TTL

Parámetro	Especificación
Voltaje	5V – 36V
Corriente	<38 mA
Tamaño	23.2mm x 69 mm
Ángulo de disparo	30°
Agujero fijo	16 mm de espacio, 1 m de radio
Tasa de adquisición	20 Hz
Distancia de medición	40 mm – 4,000 mm
Tasa de baudios	Soporta 2400 – 921600, 115200 predeterminado
Rango de error	±20 mm
Interfaz de comunicación	UART
Temperatura de operación	-20~70°C

Se optó por utilizar la ESP32 debido a sus características que facilitan la conexión y rendimiento del sistema como [14]:

- Arquitectura de doble núcleo
- Conectividad Wi-Fi y Bluetooth
- Interfaces de E/S versátiles
- Memoria integrada
- Bajo consumo de energía
- Seguridad
- Facilidad de desarrollo
- Compatibilidad con micropython y otros lenguajes de programación

Para conectar el ESP32 y el sensor, es necesario usar un convertidor de nivel (level shifter) debido a las diferencias en los niveles de voltaje: el sensor opera con señales de 5-36V, mientras que el ESP32 funciona a 3.3V. Un level shifter convierte el nivel de voltaje de señales digitales o analógicas entre dispositivos con diferentes requerimientos de voltaje. Este componente asegura la correcta comunicación entre dispositivos que no son compatibles directamente debido a sus distintos voltajes operativos [15].

En la Figura 3 se muestra el diagrama de conexión entre el level shifter, el ESP32 y el sensor.

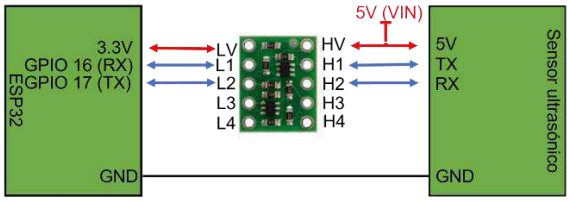


Figura 3: Conexiones de ESP32 y sensor a level shifter.

3.2 Capa de conectividad

La vivienda en la que se instaló el sistema está compuesta de 2 plantas con elevación como se puede observar en la Figura 4, por lo que se tuvieron que instalar dos repetidores de señal Wi-Fi para que la señal llegara de manera adecuada hasta donde estaba el sistema, pues está en el techo de la elevación para el contenedor de agua de la vivienda. Mediante programación en micropython, se le puso la red Wi- Fi y la contraseña al ESP32 para que en cuanto este estuviera encendido, intentará conectarse, la conexión fue la siguiente:

- **Conexión de módem primario a repetidor:** El módem inicial, que proporciona la conexión a internet, se conecta a la red 2.4 del primer repetidor utilizando una conexión inalámbrica. Este repetidor se configura en modo de repetidor o extensor de red inalámbrica. Esto significa que recibe la señal del módem inicial y la repite, ampliando así el alcance de la red inalámbrica.
- **Conexión de primer repetidor a segundo repetidor:** El segundo repetidor se conecta al primer repetidor utilizando una conexión inalámbrica. Esto implica configurar el segundo repetidor para que busque y se conecte a la red extendida por el primer repetidor. Una vez conectado, el segundo repetidor también actúa como un extensor de red, repitiendo la señal recibida del primer repetidor y ampliando aún más el alcance de la red inalámbrica.

Al configurar los repetidores, es importante tener en cuenta factores como la distancia entre los dispositivos, los obstáculos físicos que pueden interferir con la señal inalámbrica, y la saturación del espectro de frecuencia 2.4 GHz debido a la presencia de otros dispositivos inalámbricos.

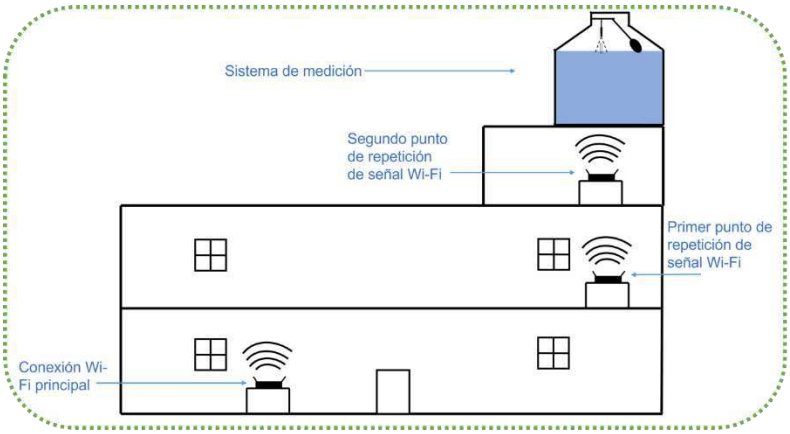


Figura 4: Red Wi-Fi para el sistema.

3.3 Capa de análisis y procesado

El ESP32 se alimenta a través de un adaptador de corriente, al momento que ya está encendido comienza a conectarse a la red Wi-Fi que se le programó y al mismo tiempo crea una lista en formato ”.json” para guardar los datos en la memoria flash mediante una EPROM simulada. Una vez que ya se encuentra conectado a la red Wi-Fi, procede a intentar conectarse al broker de Azure, el cual es un intermediario que gestiona la comunicación entre diferentes dispositivos o aplicaciones, en este caso, facilitando el intercambio de mensajes entre el dispositivo y los servicios en la nube de Azure.

Si se conecta de manera exitosa, procede a suscribirse al IoT Hub, el cual es un servicio en la nube que habilita la comunicación bidireccional y segura entre el dispositivo y la nube, permitiendo que los datos sean enviados y recibidos de manera eficiente. Una vez que se suscribe, comienza a recibir los datos que le envía el sensor y los almacena en la base de datos MySQL, que es de código abierto que organiza, almacena y recupera datos de manera estructurada, utilizando tablas para facilitar el acceso y la manipulación de la información. mediante Node-RED. Todo este proceso se puede apreciar en el diagrama de flujo de la Figura 5.

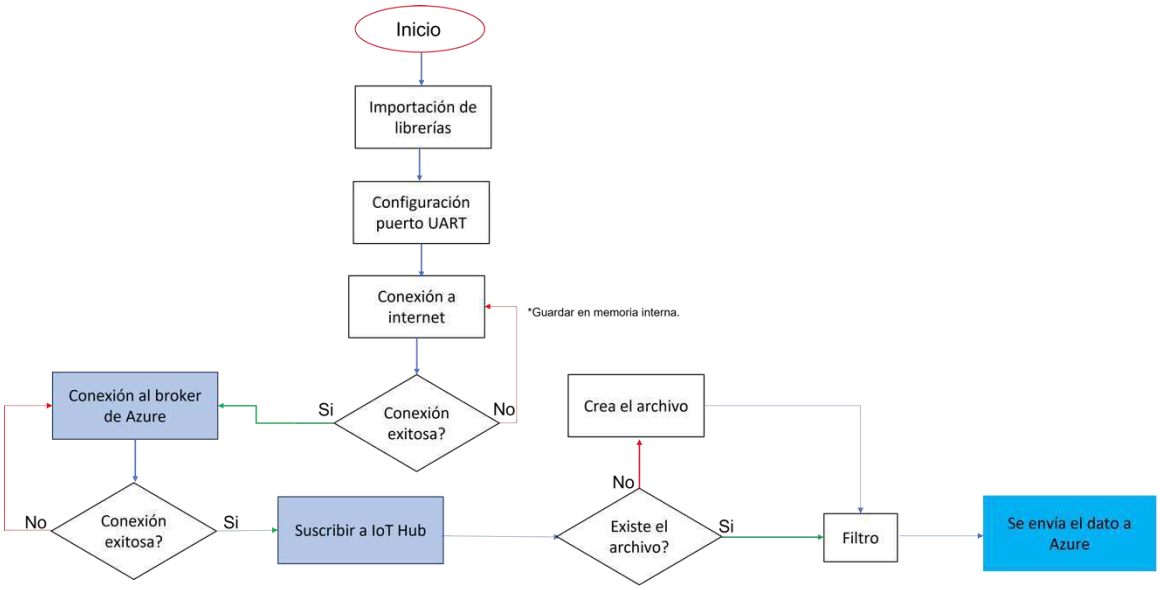


Figura 5: Diagrama del sistema.

3.3.1 Node-RED

Node-RED facilita la creación de aplicaciones IoT de forma visual y sencilla. Se utiliza principalmente para conectar dispositivos, servicios en la nube y API's de manera fácil y rápida, permitiendo crear flujos de trabajo (flows) que automatizan tareas y procesos, en la Figura 6 se muestra el diagrama de flujo de como funciona Node-RED para guardar los datos que llegan en la base de datos.

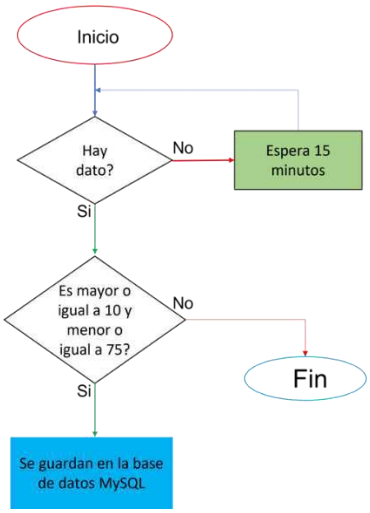


Figura 6: Diagrama de flujo de node-RED.

3.4 Capa de aplicación

La capa de aplicación se basa en una interfaz de usuario, la cual es una característica integrada que permite crear paneles de control personalizados para monitorear y controlar dispositivos y aplicaciones IoT de manera visual. El diseño de la interfaz de usuario es el resultado de definir la forma, función, utilidad y ergonomía que afecta a la apariencia del sitio web, es decir, la manera en la que se interactúa directamente con el usuario. La interfaz de usuario de la aplicación esta conformada por 3 secciones como se muestra en la Figura 7.

Figura 7: Interfaz gráfica de usuario.

3.4.1 Sección del clima

La primera parte de la interfaz que se muestra es sobre el clima de donde se encuentra instalado el sistema. En esta pantalla inicial, se encuentra una detallada recopilación de información vital sobre las condiciones climáticas actuales.

Información mostrada:

- **Clima Actual:** Condiciones del clima en tiempo real
- **Velocidad del Viento y Humedad:** En m/s y porcentaje
- **Temperatura Actual:** En °C
- **Temperatura Máxima y Mínima:** En °C
- **Horarios del Amanecer y Puesta del Sol:** Horario estándar central
- **Condiciones del Clima:** Descripción del clima en tiempo real en la ciudad

Con esta primera parte de la interfaz, se ofrece una visión completa y detallada del tiempo en la ciudad donde se instala el sistema, con esto se planea dar información detallada para que el usuario pueda estar informado de las condiciones climáticas y pueda planear sus actividades.

3.4.2 Panel de control

En esta segunda parte de la interfaz se cuenta con información como la fecha y hora actual, botones para mostrar los datos y un mensaje que le recuerda al usuario de revisar el nivel y desconectar su bomba de llenado en caso de tenerla conectada.

Esta sección tiene 6 botones, el funcionamiento de cada uno se explica a continuación:

- Últimas 4 horas
- Últimas 8 horas
- Último día
- Últimos 2 días
- Última semana
- Limpiar gráficas

3.4.3 Interfaz

En esta tercera parte de la interfaz de usuario se tienen dos gráficas y dos gauges. Los gauges son indicadores visuales que muestran datos en forma de medidores circulares, proporcionando una representación gráfica del valor actual en un rango específico. En Node-RED, se utilizan para visualizar y monitorear datos en tiempo real, facilitando la interpretación rápida de la información [16].

- **Gráficas de datos**

Una grafíca los litros que contiene el contenedor de agua, y otra grafíca los cm que hay desde el fondo del contenedor de agua hasta donde llega el nivel del agua.

La primer gráfica es la de litros, estos datos se obtienen mediante la fórmula del volumen de un cilindro (Verecuación3.2).

$$V = \pi \times (r)^2 \times h \tag{3.2}$$

Donde r es el radio de la base del cilindro y h es la altura del cilindro. Por lo que usando las medidas del contenedor de agua, el cálculo queda de la siguiente manera:

Calculando:

$$V = \pi \times (50\ \text{cm})^2 \times 75\ \text{cm}$$

$$V = \pi \times 2500\ \text{cm}^2 \times 75\ \text{cm}\ V = 187500\pi\ \text{cm}^3$$

Por lo tanto, el volumen del cilindro es aproximadamente 589048,62 cm^3, utilizando este resultado, nos queda que:

$$V_{\text{litros}} = 589048{,}62 cm^3\ 1000\ cm^3/L$$

$$V_{\text{litros}} \approx 589{,}05\ \text{L}$$

Esto indica que los litros que le caben al contenedor de agua serían aproximadamente 589,05 L.

- **Indicadores de porcentaje y litros restantes de agua en el contenedor de agua**

La interfaz de usuario cuenta con dos indicadores diferentes, el primero es un indicador de tipo “level”, en él se muestra cuántos litros tiene el contenedor de agua en tiempo real, se le declararon los parámetros desde 0 hasta 600 debido a que no puede haber menos de 0 litros y tampoco puede haber mas de 600 litros.

El segundo indicador que se tiene es de tipo ”gauge”, su función es mostrar cuánto porcentaje del 100% de agua hay disponible. Para que se lograran interpretar los datos de esta manera, se utilizó la siguiente fórmula, (Ver ecuación 3.1):

$$\left(\frac{dato\ x\ 100}{590}\right) \tag{3.1}$$

Donde *dato* es la lectura que manda el sensor, 100 es el porcentaje de lleno total y 590 representa el lleno del contenedor de agua en litros.

De este modo, dependiendo de la lectura que mande el sensor, el porcentaje de agua disponible se actualiza.

3.4.4 Conexión con telegram

En el contexto de la gestión inteligente de recursos, la necesidad de supervisar el nivel de agua en un contenedor es crucial para optimizar su uso. Para abordar esta necesidad, se ha implementado un sistema de notificaciones vía chatbot de Telegram que informa al usuario sobre el estado del contenedor de agua, ya sea casi lleno o casi vacío. Para una correcta ejecución de las notificaciones es necesario analizar primero los datos que envía el sensor siguiendo la lógica que se muestra en las Figuras 8 y 9:

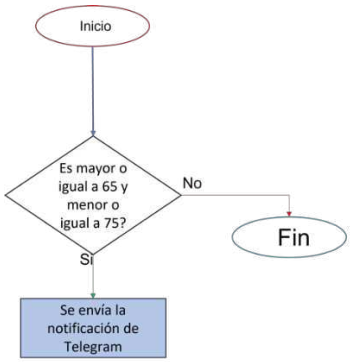


Figura 8: Diagrama de flujo para notificación cerca de vaciarse el contenedor.

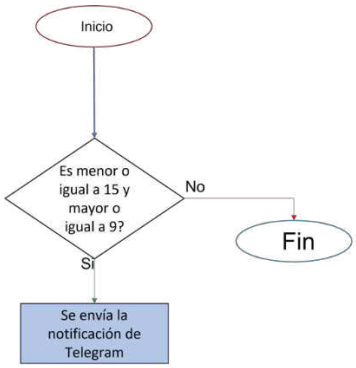


Figura 9: Diagrama de flujo para notificación cerca de llenarse el contenedor.

3.5 Investigación de acumulación de humedad dentro del contenedor de agua

Tiempo después de que el sensor fue colocado en el contenedor de agua, para medir el nivel, nos encontramos con un problema inesperado: la formación de gotas de agua en el sensor debido a la humedad generada dentro del contenedor de agua. Esta condición comprometía la precisión de las mediciones y planteaba la necesidad de encontrar una solución efectiva. Para abordar este desafío, decidimos llevar a cabo un experimento controlado.

Se creó un entorno experimental consistente en una tabla de acrílico y un contenedor de almacenamiento donde se colocaron 3 unidades de filtrado de diferentes tamaños y de forma cónica como los que se muestran en la Figura 10, estas unidades adheridas al acrílico, simulan una unidad del filtrado para la acumulación de agua en el sensor, cada una cortada de manera específica para representar distintas condiciones dentro del contenedor de agua, las medidas del contenedor de agua se pueden apreciar en la Figura 11.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 10, pp. 122 - 138.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

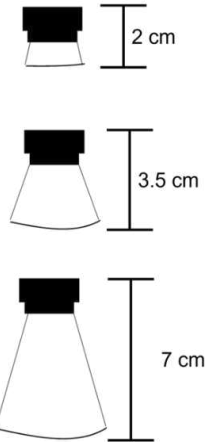


Figura 10: Unidades de filtrado. **Figura 11:** Medidas de las unidades.

3.6 Implementación experimental

El sistema de medición se instaló en un contenedor de agua de 600 litros, el sensor se colocó como se puede apreciar en la Figura 12, a una altura de 85 cm, 10 cm de distancia entre el sensor y el nivel máximo del agua, pues la altura desde el fondo del contenedor de agua al punto máximo que alcanza el agua es de 75 cm, esta distancia se midió con un flexómetro justo después de que el contenedor de agua se había llenado, de esta manera no había modo de que se hubiera consumido agua.

Figura 12: Instalación del sensor en el contenedor de agua.

El contenedor de agua cuenta con un flotador para prevenir que se tire el agua, por lo que el nivel máximo que puede alcanzar es de 590 litros aproximadamente, dichos litros, se calcularon usando la fórmula del volumen de un cilindro (Ver ecuación 3.2).

También se calculó cuántos centímetros representan un litro linealmente con la fórmula (Ver ecuación 3.3) . Dado que el contenedor de agua tiene una capacidad de 590 litros y una altura de 75 centímetros, podemos calcular cuántos centímetros lineales hay en un litro:

$$1\ litro = \frac{\text{Altura del contenedor (cm)}}{\text{Capacidad del contenedor (litros)}} \tag{3.3}$$

Calculando:

$$1\ litro = \frac{\text{Altura del contenedor (cm)}}{\text{Capacidad del contenedor (litros)}} = \frac{75}{590} \approx 0{,}1271\ cm/litro$$

4. Resultados

4.1 Investigación de acumulación de humedad dentro del contenedor de agua

Durante el experimento, se monitoreó el comportamiento de la simulación del sensor, tomando medidas precisas sobre la formación de gotas en cada configuración. Se observó que la unidad de filtrado más pequeña (2 cm) inicialmente retuvo poca agua, mientras que las unidades de 3.5 cm y 7 cm no acumularon agua. Con el tiempo, la unidad de 2 cm comenzó a acumular más agua, mientras que las otras unidades mostraron acumulación limitada o nula. Después de un día, se notó que las unidades más grandes drenaban mejor el agua, debido a sus paredes más largas y la mayor superficie de evaporación. Estos resultados indican que la eficacia del sensor mejora con unidades de mayor tamaño, lo que puede optimizar el monitoreo en ambientes húmedos. Se decidió diseñar una nueva unidad de filtrado en 3D de 8 cm de alto y diámetro como la que se muestra en la Figura 13, para integrar con el sensor y mejorar su rendimiento.

Figura 13: Unidad de filtrado diseñada en 3D.

4.2 Resultados de las mediciones del sistema

La Figura 14 muestra una parte de la bitácora realizada, se puede apreciar que se cuenta con registros de las actividades previamente mencionadas, WC (marcada con azul), baño personal (marcada con rojo), y lavado de ropa (marcado con amarillo), dichas actividades, se mostrarán a continuación para apreciar como se refleja el consumo de agua en estas actividades.

17/05/24							
	6:00 a.m.	Baño	480 L	418 L	30.02 cm	21.8 cm	
	7:15 a.m.	WC	418 L	413 L	30.58 cm	30.02 cm	
	7:20 a.m.	WC	413 L	408 L	31.27 cm	30.58 cm	
	7:30 a.m.	Baño	408 L	371 L	36.19 cm	31.27 cm	
	8:30 a.m.	Baño	371 L	337 L	40.66 cm	36.19 cm	
	1:40 p.m.	WC	330 L	325 L	32.21 cm	41.6 cm	
	5:00 p.m.	WC	306 L	299 L	45.68 cm	44.66 cm	
18/05/24	9:30 p.m.	Baño	313 L	250 L	52.03 cm	43.78 cm	
	10:20 p.m.	Baño	250 L	202 L	58.4 cm	52.03 cm	
19/05/24							
	6:30 a.m.	WC X2	171 L	158 L	64.18 cm	62.44 cm	
	5:10 p.m.	Baño	350 L	309 L	44.35 cm	38.92 cm	
20/05/24							
	6:00 a.m.	Lavado de ropa	267 L	208 L	57.64 cm	49.78 cm	
	6:42 a.m.	Se conectó la bomba	191 L	362 L	37.35 cm	58.82 cm	
	7:40 a.m.	2 lavadas de ropa	362 L	242 L	53.06 cm	37.35 cm	

Figura 14: Bitácora del consumo de agua en la vivienda.

Los siguientes datos son de otro baño personal, esta ducha fue 2 días después de la que se muestra anteriormente, para esta ducha se puede apreciar en la Figura 15 que había 350 L antes de bañarse; posteriormente en la Figura 16 se puede apreciar que quedaron 309 L después de la ducha esto representa un consumo de 41 L.

Figura 15: Litros restantes antes de que una persona tomara una ducha: 350 L a las 4:48 pm.

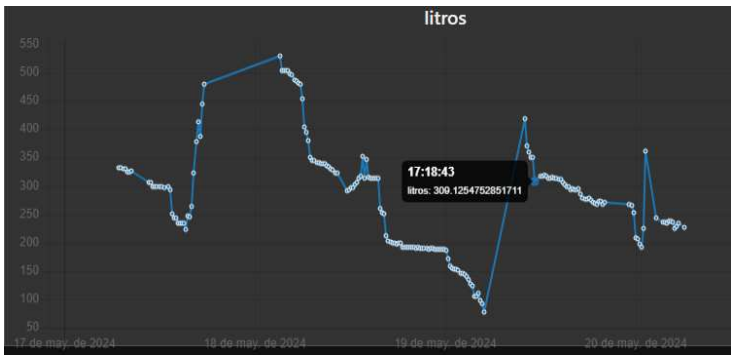


Figura 16: Litros restantes después de que una persona tomara una ducha: 309 L a las 5:18 pm.

Entre los datos que se recopilaron, destacan los siguientes:

Lavado de ropa: El análisis reveló que el consumo de agua durante el lavado de ropa varió dependiendo del tipo y modelo de lavadora utilizada. También se debe considerar la cantidad de ropa que se lava, ya que se utiliza una diferente cantidad de agua dependiendo de si se trata de

mucha o poca ropa. Sin embargo, en promedio, se observó un consumo de aproximadamente 60 litros por ciclo de lavado.

Descargas al inodoro: El sensor registró un consumo promedio de 5 litros por descarga en el inodoro. Esta cifra se mantuvo constante a lo largo del período de observación.

Baños personales: El consumo de agua durante los baños personales mostró variabilidad significativa, dependiendo del tiempo de duración de la actividad. Se observaron consumos que oscilaron entre 30 y 60 litros.

Los resultados obtenidos reflejan la importancia de implementar sistemas de medición de agua en entornos residenciales para comprender y controlar el consumo del recurso hídrico. La información recopilada puede ser útil para promover prácticas de uso eficiente del agua y contribuir a la conservación del medio ambiente.

Se sugiere continuar con la monitorización del consumo de agua a lo largo del tiempo para evaluar posibles cambios en los patrones de uso y realizar comparativas a largo plazo. Ciertas actividades domésticas, como el lavado de manos, dientes, trastes, etc., no se consideraron en el estudio debido a que el consumo de agua en estas actividades es mínimo y no representa un cambio significativo en el nivel de agua.

5. Conclusiones

En esta investigación se ha propuesto una arquitectura para un sistema de medición del consumo de agua que abarca aspectos clave como la medición del consumo, el registro local, y el almacenamiento y visualización de los datos obtenidos. La arquitectura propuesta es tanto funcional como integral, ya que cubre diversos aspectos de la medición y es mantenible debido a su alto nivel de desacoplamiento y fácil implementación.

Además, se ha desarrollado un sistema basado en esta arquitectura que obtiene lecturas cada 15 minutos y notifica al usuario sobre el estado de su contenedor mediante Telegram. Este sistema demuestra su capacidad para integrar diferentes tecnologías y lenguajes de programación, comunicar diversos servicios en la nube, utilizar hardware de bajo costo y emplear software libre. Las pruebas numéricas indican que el sistema tiene un margen de error del 2.5%, lo que equivale a 15 litros.

Durante el desarrollo del sistema, se identificaron varias limitaciones que afectan su rendimiento y precisión. Una de las principales limitaciones es la estabilidad de la conexión a Internet, que puede interrumpir el flujo de información y limitar la efectividad del monitoreo remoto, pues es complicado mantener la conexión Wi-Fi hasta las azoteas de las viviendas. La humedad ocasional dentro del contenedor de agua también impactó negativamente las lecturas del sensor, introduciendo errores en los datos obtenidos, pues debido a la acumulación de agua en la punta del sensor se obtenian lecturas negativas o de 0 cm. Además, el sensor presenta una resolución de 0.1271 centímetros por litro, lo que puede afectar la estimación real del nivel de agua.

Sin embargo, la unidad de filtrado diseñada en esta investigación representa una mejora significativa. Esta unidad minimiza el impacto de la humedad en el sensor mediante su forma cónica ya que el agua acumulada escurre por las paredes sin interferir con el sensor evitando la acumulación de agua y mejora la precisión de las lecturas. A pesar de estas mejoras, se debe considerar el

consumo eléctrico del sistema para garantizar que sea portable y adecuado para diversas condiciones ambientales.

Además, el registro continuo de actividades domésticas relacionado con el consumo de agua abre la posibilidad de integrar tecnologías avanzadas, como inteligencia artificial, en el futuro. Estas tecnologías podrían facilitar la detección de actividades humanas específicas, identificar fugas con mayor precisión y predecir el consumo estimado del usuario. Con el tiempo, el sistema puede ser optimizado para abordar estas limitaciones y expandirse hacia aplicaciones más avanzadas, garantizando su efectividad y adaptabilidad en diversos contextos.

Finalmente, la versatilidad de la plataforma permite su expansión hacia otras aplicaciones, como la automatización de bombas para llenar un contenedor de agua y la integración de paneles solares para su alimentación, entre otros. Esta capacidad de adaptación y crecimiento futuro garantiza que el sistema no solo sea útil en el contexto actual, sino que también pueda evolucionar para enfrentar nuevas necesidades y desafíos.

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología CONAHCYT por su apoyo al Laboratorio Nacional de Sistemas Embebidos, Diseño Electrónico Avanzado y Microsistemas (LN-SEDEAM), proyectos números 282357, 293384, 299061, 314841, 315947 y 321128}

Referencias

[1] CONAGUA, "Conagua, acuíferos," *Sistema de Información Geográfica de Aguas Subterráneas (SIGAIMS)*, [Online]. Available: https://sigaims.conagua.gob.mx/dma/acuiferos.html. [Accessed: Mar. 14, 2023].

[2] Tetreault, D., & Zacatecas. (2014, junio). *La toma del agua zacatecana*.

[3] Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Asociación de Metrología de México A.C. (AMM), Sociedad de Medidores de las Américas (S. BADGER), Oficina de Morelia, y Proyectos y Medidas de Agua CAASA (P. M. A. CAASA). (n.d.). *Proyecto de norma oficial mexicana proy-nom-012-4-scfi-2017, instrumentos de medición-medidores para agua potable fría y caliente-parte 4: Requisitos no metrológicos (cancelar a la NOM-012-SCFI-1994) prefacio*.

[4] Rodríguez, A. V., Flores, R. A., Romero, V. M. O., & Esquivel, D. I. O. (n.d.). *El uso urbano del agua subterránea en competencia con el uso agrícola: El caso de la zona metropolitana Zacatecas-Guadalupe*. Ambiental y, 223.

[5] Vannesa, B. (2014, mayo 17). Tipos de contadores eléctricos. *Germen Startup*. https://germenstartup.wordpress.com/2014/05/17/tipos-de-contadores-electricos/

[6] Rivera, P., & Aguila, A. G. (2015). La gestión integral del agua en zonas urbanas: Caso de estudio Zacatecas-Guadalupe, México. *Tecnología y ciencias del agua, 6*(3), 125–142.

[7] Kulkarni, S. A., Raikar, V. D., Rahul, B., Rakshitha, L., Sharanya, K., & Jha, V. (2020). Intelligent water level monitoring system using IoT. In *2020 IEEE International Symposium on Sustainable Energy, Signal Processing and Cyber Security (iSSSC)* (pp. 1–5). IEEE.

[8] Trilliant. (2020, enero). *Diferencia entre medidores tradicionales e inteligentes*. https://primestone.com/diferencia-entre-medidores-tradicionales-e-inteligentes/

[9] Fuentes, H., & Mauricio, D. (2020). Smart water consumption measurement system for houses using IoT and cloud computing. *Environmental Monitoring and Assessment, 192*(9), 602. https://doi.org/10.1007/s10661-020-08584-7

[10] Olisa, S. C., Asiegbu, C. N., Olisa, J. E., Ekengwu, B. O., Shittu, A. A., & Eze, M. C. (2021). Smart two-tank water quality and level detection system via IoT. *Heliyon, 7*(8). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07835

[11] Perumal, T., Sulaiman, M. N., & Leong, C. Y. (2015, October). Internet of things (IoT) enabled water monitoring system. In *2015 IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)* (pp. 86-87). IEEE.

[12] Ray, A., & Goswami, S. (2020, February). IoT and cloud computing based smart water metering system. In *2020 International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)* (pp. 308-313). IEEE.

[13] León Lazo, R. I., & Macancela Sumba, J. G. (2024). Construcción de un medidor de agua inteligente mediante Arduino para reducir las pérdidas en la distribución de agua.

[14] Cameron, N., & Cameron, N. (2021). ESP32 microcontroller features. In *Electronics projects with the ESP8266 and ESP32: Building web pages, applications, and Wi-Fi enabled devices* (pp. 641–682).

[15] Montiel-Nelson, J. A., Garcia, J. C., & Sosa, J. (2015). High performance single supply CMOS level up/down shifter for multiple voltages. In *Midwest Symposium on Circuits and Systems*.

[16] Microsoft Azure. (2024, junio). *Azure functions: informática sin servidor*. https://azure.microsoft.com/es-mx/services/functions/

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 11, pp. 139 - 153.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Caracterización de un Sistema de Lastre para un Minisubmarino

Barrales Romero Missael Eduardo[1]. Flores Mena José Eladio[1], Michua Camarillo Antonio[1], Edy Flores Flores[2], Gutiérrez Arias Moisés[1] y Morin Castillo Monserrat[1].

Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Av. San Claudio y 18 sur, San Manuel, Puebla 72570, Pue., México.[1]
Preparatoria Emiliano Zapata, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Calle 4 Nte 6, Centro, 72000 Heroica Puebla de Zaragoza, Pue.[2]

barrales.missael@gmail.com

Resumen

El sistema de lastre es un componente esencial en la operación de un minisubmarino explorador, ya que permite controlar la flotabilidad y la estabilidad del vehículo bajo el agua. Este artículo presenta un modelo matemático para la caracterización y análisis del sistema de lastre en un minisubmarino, utilizando principios de dinámica de fluidos y teoría de control. Se derivan las ecuaciones que describen el comportamiento del lastre en función de la cantidad de agua o aire dentro de los tanques, así como su impacto en la estabilidad y la maniobrabilidad del minisubmarino. Los resultados obtenidos permiten prever el comportamiento del vehículo en diferentes condiciones de operación, proporcionando una herramienta valiosa para su diseño y optimización.

Palabras clave: Lastre, minisubmarino, flotabilidad, estabilidad, dinámica de fluidos, control.

1. Introducción

El diseño de sistemas de lastre en submarinos es crucial para asegurar su correcto funcionamiento durante las misiones exploratorias. Un sistema de lastre bien diseñado permite al minisubmarino modificar su flotabilidad para sumergirse, mantenerse a una profundidad determinada o emerger. La caracterización matemática de este sistema es fundamental para comprender y prever el comportamiento del submarino bajo diferentes condiciones operativas. Este artículo se centra en el desarrollo de un modelo matemático para el sistema de lastre de un minisubmarino explorador, considerando tanto la dinámica de fluidos como los principios de control necesarios para su operación.

En el mundo moderno, las aplicaciones submarinas se han convertido en una parte esencial de diversas industrias, desde la exploración y extracción de recursos naturales hasta la investigación científica y la defensa. Entre los elementos más críticos para el éxito de estas operaciones se encuentra el control de flotabilidad, un factor que determina la estabilidad y la capacidad de maniobra de cualquier estructura o vehículo subacuático. En este contexto, los sistemas de lastre juegan un papel fundamental al permitir ajustes precisos en la flotabilidad, garantizando que la posición vertical y la estabilidad de los objetos sumergidos puedan ser controladas de manera eficiente.

El concepto de flotabilidad y el control de la misma han sido estudiados extensamente desde tiempos antiguos, con Arquímedes siendo uno de los primeros en formalizar los principios detrás de estos fenómenos. Sin embargo, la complejidad de las operaciones submarinas contemporáneas ha llevado a la necesidad de desarrollar sistemas de lastre avanzados que no solo ajusten la flotabilidad,

sino que también ofrezcan un control fino del posicionamiento vertical y la estabilidad dinámica en un entorno fluido cambiante.

Los sistemas de lastre modernos se han vuelto cada vez más sofisticados, integrando sensores avanzados, actuadores precisos y algoritmos de control que permiten una respuesta rápida y adaptativa a las condiciones subacuáticas. Estos sistemas son cruciales en aplicaciones donde la precisión es vital, como en la operación de submarinos, vehículos autónomos subacuáticos (AUVs), y plataformas de perforación. Además, su capacidad para mantener la estabilidad en condiciones adversas es esencial para garantizar la seguridad y el éxito de las misiones.

En este artículo, se presenta un estudio detallado sobre la caracterización de un sistema de lastre con control de posicionamiento vertical. El objetivo principal es evaluar su desempeño bajo diversas condiciones de operación, analizando factores como la capacidad de respuesta, la precisión del control, y la estabilidad del sistema en un entorno subacuático. A través de una combinación de simulaciones numéricas y pruebas experimentales, se busca proporcionar una visión integral de cómo estos sistemas pueden ser optimizados para cumplir con los exigentes requisitos de las aplicaciones modernas.

La caracterización de sistemas de lastre es un paso crucial en el diseño y desarrollo de tecnologías subacuáticas avanzadas. Al comprender a fondo las propiedades dinámicas y los límites operativos de estos sistemas, es posible mejorar su diseño, implementar controles más eficientes, y predecir con mayor precisión su comportamiento en situaciones reales. Además, este conocimiento permite identificar posibles áreas de mejora, tales como la reducción del consumo energético, la minimización de los tiempos de respuesta, y la maximización de la estabilidad en entornos altamente dinámicos.

En las siguientes secciones, se describirán en detalle los aspectos teóricos que sustentan el funcionamiento de los sistemas de lastre, el diseño del sistema estudiado, y los métodos empleados para su caracterización. Posteriormente, se presentarán los resultados obtenidos, los cuales son analizados para determinar las fortalezas y limitaciones del sistema. Finalmente, se discutirán las conclusiones derivadas de este estudio y se sugerirán posibles líneas de investigación futura para el desarrollo de sistemas de lastre más avanzados y eficientes.

2. Descripción de sistema de lastre

El sistema de lastre implementado en el minisubmarino es de naturaleza pasiva, diseñado para minimizar el número de componentes móviles y motores requeridos. Este enfoque simplifica la operación del minisubmarino y reduce el consumo de energía, un aspecto crítico para la autonomía del vehículo en misiones prolongadas.

2.1 Componentes principales

El sistema de lastre está compuesto por tanques de agua controlados por válvulas que permiten la entrada y salida del agua para ajustar la flotabilidad. Al llenarse los tanques, el submarino aumenta su densidad y comienza la inmersión; al vaciarse, la densidad disminuye y se produce la emersión.

Para poder obtener tener un control sobre el posicionamiento del lastre y del vehículo en un punto especifico de manera vertical debemos tomar en cuenta el Principio de Arquímedes. El principio de Arquímedes es un principio fundamental de la física, específicamente en la mecánica de fluidos, que establece lo siguiente:

"Todo cuerpo sumergido total o parcialmente en un fluido experimenta un empuje hacia arriba (fuerza de flotación) igual al peso del fluido desplazado por el cuerpo.".

- Empuje hacia arriba (fuerza de flotación): Cuando un objeto se sumerge en un fluido (como agua, aire, etc.), el fluido ejerce una fuerza hacia arriba sobre el objeto. Esta fuerza es lo

que conocemos como "empuje" o "fuerza de flotación". Es la razón por la que algunos objetos flotan en el agua, mientras que otros se hunden.

- Peso del fluido desplazado: El volumen de fluido que el objeto desplaza al sumergirse es clave. Si el peso del fluido desplazado es mayor que el peso del objeto, el objeto flotará. Si es menor, el objeto se hundirá. Así la fuerza de flotación está dada por la siguiente expresión,

$$\boldsymbol{F_b = \rho * V * g} \quad \textbf{(1)}$$

donde, $\boldsymbol{F_b =}$ Fuerza de flotación, $\boldsymbol{\rho =}$ densidad del fluido = 1000 kg/m^3, $\boldsymbol{V =}$ Volumen del fluido desplazado = π R^2 L, $\boldsymbol{g =}$ aceleración debido a la gravedad = 9.8 m/s^2. Las dimensiones del sistema de lastre están dadas en la siguiente tabla 1.

Tabla 1. Datos de dispositivo lastre

Dimensiones		
L = 0.25m		R = 0.11 m
Material Acrílico		
ρ_A = 1190 kg / m^3 Densidad	D = 4in Diámetro	Grosor = 3 mm
Material Aluminio		
ρ_{Al} = 2.75 gr / cm^3 Densidad		Grosor = 4 mm

Con estos datos de la Tabla 1 se obtiene que la fuerza de flotación del lastre es de $F_b = 93.129\ N$.

Por otra parte, es importante recordar el balance de fuerzas en la dirección vertical durante la inmersión o emersión de un objeto en un fluido es crucial para comprender su comportamiento, ya sea que el objeto esté flotando, sumergiéndose o emergiendo.

2.2 Fuerzas Actuantes en la Dirección Vertical

2.2.1 Peso del objeto (W):

- Actúa hacia abajo (en la dirección de la gravedad).
- Es la fuerza que la gravedad ejerce sobre el objeto.
- Se calcula como:

$$W = m \cdot g \quad (2)$$

Donde m es la masa del objeto y g es la aceleración debido a la gravedad.

2.2.2 Fuerza de flotación (F_b)

- Actúa hacia arriba (opuesta a la gravedad).
- Es la fuerza ejercida por el fluido sobre el objeto, según el principio de Arquímedes.
- Se calcula como:

$$F_b = \rho * V * g \quad (3)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, V es el volumen de fluido desplazado, y g es la aceleración debido a la gravedad.

2.2.3 Fuerza de adición de masa (Z_A)

- Actúa en sentido contrario al movimiento del lastre.
- Esta fuerza es debida a la presión debido a las oscilaciones del agua que rodea al lastre, pero una visión incorrecta de esta fuerza es que masa del fluido es arrastrada por el lastre.
- Se calcula como:

$$Z_A = -Z_{\dot{w}}\,\dot{w} \tag{4}$$

donde a $Z_{\dot{w}}$ es el coeficiente de masa añadida y $\dot{w}$ es la velocidad en la dirección de ascenso o descenso. Para un vehículo marino como nuestro lastre, se encuentra que cuando hay simetría de tres planos, los coeficientes de masa añadida cruzados son cero, solo son distintos de cero los elementos de la matriz diagonal, para nuestro lastre en forma de cilindro circular se encuentra que $Z_{\dot{w}} = \pi\rho R^2 L$ que coincide con la masa desplazada (Imlay 1961).

2.2.4 Fuerza de fricción viscosa (F_f)

- Actúa en sentido contrario al movimiento del lastre.
- Esta fuerza es debida a la interacción que tiene el lastre con las moléculas del agua cuando se mueve, si el cuerpo no se mueve esta fuerza es nula.
- Se calcula como:

$$F_f = -K\,\eta\, w \tag{5}$$

donde a K es el coeficiente de Stokes que depende de la geometría del cuerpo en movimiento, η es la viscosidad del agua y w es la velocidad del cuerpo en movimiento, el factor de Stokes para un cuerpo en forma de esfera esta dado como K = 6 π R. Para nuestro sistema de lastre lo podemos determinar por medio de una simulación numérica con COMSOL, resolviendo la ecuación de Navier Stokes (J. E. Flores-Mena and et. al. 2024).

2.3 Condiciones de Equilibrio y Movimiento

2.3.1 Flotación (Equilibrio Estable)

- Cuando un objeto flota en el fluido, las fuerzas de peso y flotación están equilibradas.
- Esto ocurre cuando:

$$W = F_b \tag{6}$$

Es decir, el peso del objeto es igual a la fuerza de flotación.

2.3.2 Sumersión (Movimiento Hacia Abajo)

- Si el peso del objeto es mayor que la fuerza de flotación ($W > F_b$), el objeto se hundirá.
- En este caso, hay una fuerza neta hacia abajo, lo que resulta en una aceleración hacia el fondo del fluido.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 11, pp. 139 - 153.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

2.3.3 Emersión (Movimiento Hacia Arriba):

- Si la fuerza de flotación es mayor que el peso del objeto ($F_b > W$), el objeto se elevará.
- Aquí, la fuerza neta es hacia arriba, lo que hace que el objeto suba hacia la superficie del fluido.

Debemos hacer notar que, en nuestro sistema de lastre, se consideran en un ambiente de aguas tranquilas, es decir, no hay corrientes.

2.4 Ecuación de Movimiento

El sistema de lastre que consideramos es un vehículo marino bajo el agua, este se ilustra en la figura 1, se asume que la tierra es plana y está en reposo (sistema inercial),

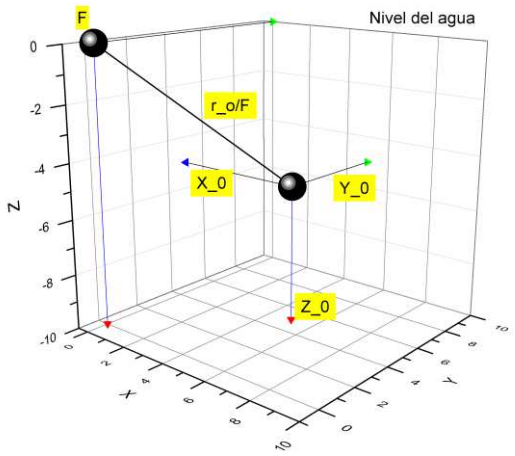


Figura 1. Sistema de lastre, esta se muestra el volumen de control donde el lastre es modelado por un cilindro circular de radio R y longitud L. El sistema Inercia F, mientras que, el sistema fijo al cuerpo es O.

Fig.1

También se muestra en la Figura 2, la situación de equilibrio estable.

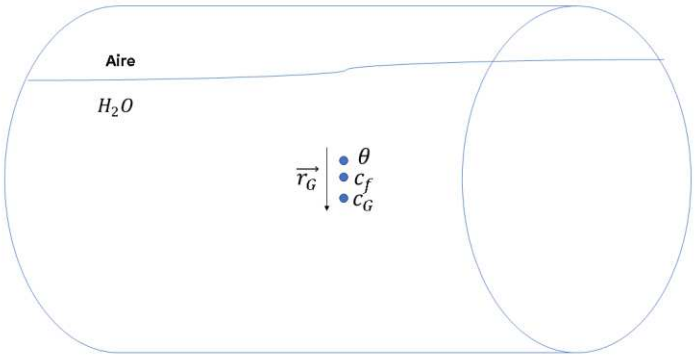


Figura 2. Se muestra la configuración de equilibrio para lo cual el centro de gravedad debe estar por debajo del centro de flotación. En el centro de gravedad actúa la fuerza gravitacional (peso), mientras que, en el centro de flotación actúa la fuerza de flota. c_G: Centro de gravedad, c_f: Centro de flotación.

Las ecuaciones dinámicas de movimiento están descritas en el enfoque Newton Euler por medio de las siguientes ecuaciones,

$$\dot{P}_c \triangleq f_c; \quad (7)$$

$$\dot{h_G} \triangleq m_c \quad (8)$$

La primera ecuación es la segunda ley de Newton, que describe la traslación del cuerpo en movimiento, mientras que la segunda ecuación es la ecuación de Euler que describe la rotación del cuerpo rígido.

$$P_c \triangleq m\, v_c; \quad (9)$$

$$h_c \triangleq I_c \omega \quad (10)$$

La primera ecuación es el momento lineal del centro de gravedad, mientras que, la segunda ecuación describe el momento angular. Siendo f_c la fuerza resultante actuando sobre el sistema, m_C es la suma de torques actuando sobre el sistema, I_C es la matriz de inercia del lastre respecto al centro de gravedad, ω es la velocidad angular del sistema fijo al cuerpo respecto al inercial (Ver Fossen).
Considerando las cantidades cinemáticas siguientes

$n = [n_1^T, n_2^T]^T$; (11) $\quad n_1 = [x, y, z]^T$; (14) $\quad n_2 = [\emptyset, \theta, \varphi]^T$ (17)

$v = [v_1^T, v_2^T]^T$; (12) $\quad v_1 = [u, v, w]^T$; (15) $\quad v_2 = [p, q, r]^T$ (18)

$r = [r_1^T, r_2^T]^T$; (13) $\quad r_1 = [X, Y, Z]^T$; (16) $\quad r_2 = [K, M, N]^T$ (19)

Donde x, y, z son las coordenadas del sistema inercial O respecto al sistema F, los ángulos de Euler describen la posición del sistema fijo al cuerpo respecto al inercial, las componentes de velocidades de traslación del vehículo son u, v, w, las componentes de la velocidad de rotación son p, q, r, las componentes de la fuerza resultante actuando sobre el sistema de lastre son X, Y, Z y finalmente, las componentes del torque resultante son K, M, N.

Las ecuaciones de Newton y Euler para un vehículo marino son las siguientes

$$m\{\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})\} = X \quad (20)$$

$$m\{\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})\} = Y \quad (21)$$

$$m\{\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})\} = Z \quad (22)$$

$$I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] = K \quad (23)$$

$$I_y\dot{q} + (I_x - I_z)rp - (p + qr)I_{zy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = M \quad (24)$$

$$I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + w)] = N \quad (25)$$

Estas seis ecuaciones describen totalmente la traslación y rotación de cualquier vehículo marino (Ver Fossen). En donde en las componentes de fuerza y torque resultantes para nuestro sistema de lastre van las expresiones de las fuerzas descritas en la sección 2.2.

Para nuestro sistema de lastre que solo se mueve en la dirección vertical, nuestro sistema tiene simetría en las tres direcciones y consideramos que tenemos configuración de estabilidad, vemos que los torques se anulan mutuamente, así solo la componente z de traslación sobrevive de modo que tenemos

$$u = 0, v = 0,\ p = 0, q = 0, r = 0 \quad (26)$$

$$m\,\dot{w} = Z \quad (27)$$

Considerando que solo son relevantes las fuerzas de flotación y el peso tenemos, donde $a = \dot{w}$, así tenemos

En la dirección vertical:

$$F_b - W = m \cdot a \quad (28)$$

Donde:

a es la aceleración del objeto en la dirección vertical.

Si $F_b > W$ será positiva (el objeto sube).

Si $W > F_b$ será negativa (el objeto baja).

2.5 Control de flotabilidad

Es muy común en submarinos y algunos vehículos submarinos, los cuales constan de compartimientos que pueden llenarse con agua para aumentar el peso del vehículo.

2.5.1 Funcionamiento:

2.5.1.1 Inmersión: Se llena el tanque de lastre con agua, aumentando el peso hasta que supere la fuerza de flotación, lo que hace que el submarino se hunda.

2.5.1.2 Emersión: Se expulsa el agua del tanque de lastre, a menudo reemplazándola con aire comprimido, lo que reduce el peso y permite que el submarino ascienda.

En donde la fuerza de flotabilidad se puede ajustar mediante el volumen.

$$F_{b1} = \rho * (V + V_b) * g \tag{29}$$

En donde $V_b =$ Volumen de agua que se puede ajustar

Para mantener el equilibrio, la nueva fuerza de flotación debe igualar el peso del objeto. Por lo tanto:

$$\rho * (V + V_b) * g = W \tag{30}$$

$$(V_b) = \frac{m}{\rho} - V \tag{31}$$

Al comenzar con el proceso de caracterización se buscó primero el punto de flotabilidad neutra tomando en cuenta los siguientes datos:

$m = 3.5\ kg$

$\rho = 1000\ kg/m^3$

$V = 1900.66355\ cm^3$

Sustituyendo en la ecuación

$$(V_b) = \frac{m}{\rho} - V \tag{32}$$

$$V_b = \frac{3.5\ kg}{1000\ kg/m^3} - (1900.66355\ cm^3) \tag{33}$$

$$V_b = 0.0035\ m^3 - 1900.66355\ cm^3 \tag{34}$$

$$V_b = 0.0035\ m^3 - 0.00190066355\ m^3 \tag{35}$$

$$V_b = 0.0015993365\ m^3 \tag{36}$$

$$V_b = 1599.3365\ cm^3 \tag{37}$$

Donde V_b es la flotabilidad neutra requerida.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 11, pp. 139 - 153.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

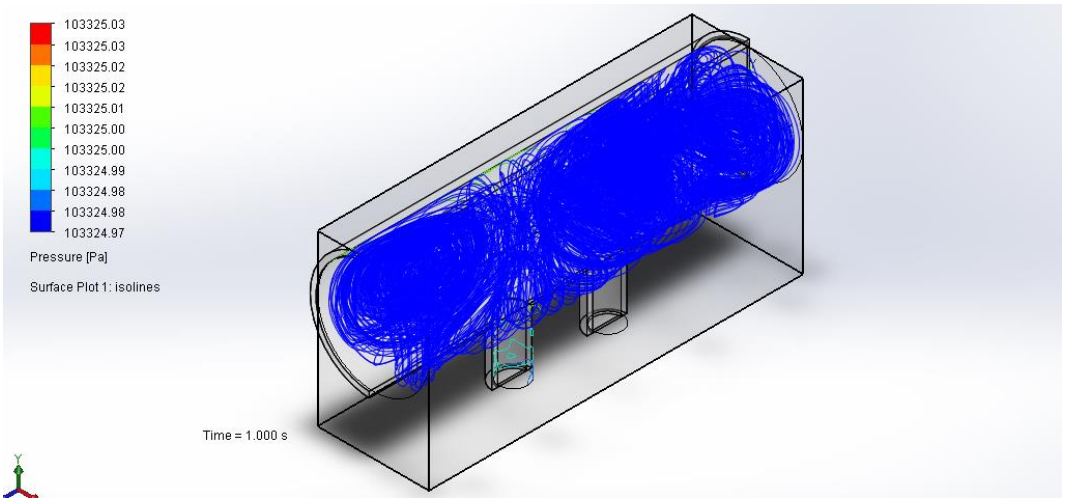


Figura 3.Análisis de fluidos internos del sistema de lastre, donde se observa la actividad que tiene el agua al entrar en el sistema.

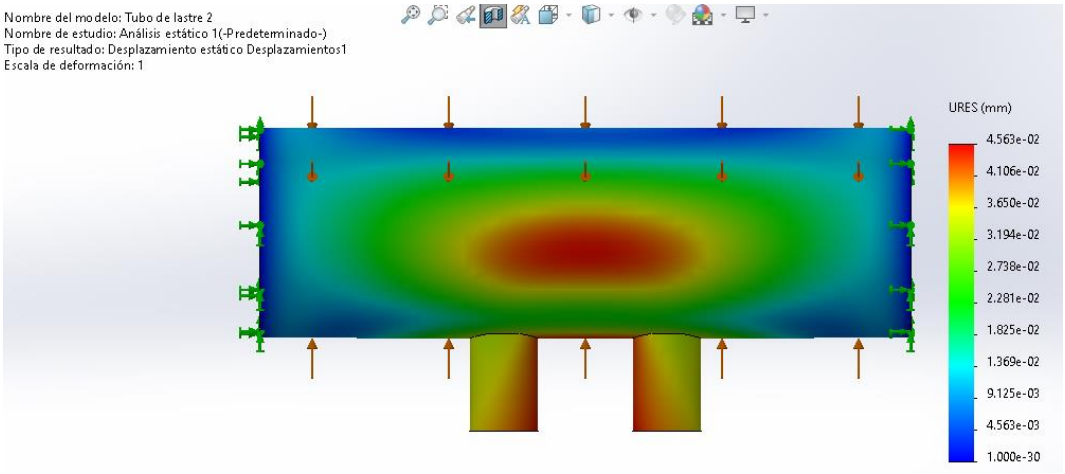


Figura 4. Análisis de presión externa del sistema de lastre tras descender 3m bajo el agua.

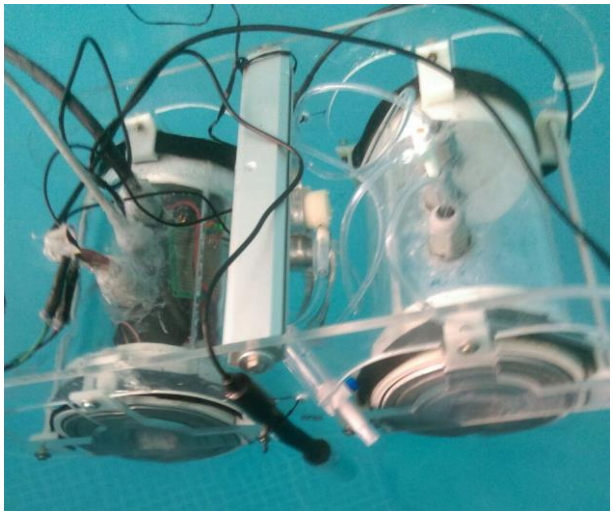


Figura 5. Sistema de lastre de un mini submarino, dispositivo implementado.

Las pruebas de inmersión y emersión realizadas con el minisubmarino proporcionaron datos clave para la caracterización del sistema de lastre. Durante las pruebas, se midieron los tiempos de respuesta del sistema al recibir comandos para cambiar la flotabilidad, así como la estabilidad del submarino durante las transiciones entre inmersión y emersión.

El material que se usó para poder controlar la entrada y salida del líquido fue con bombas de agua, las cuales tienen las siguientes características.

Esta micro bomba es ideal para proyectos o prototipos hidráulicos; lleva un flujo de agua de un punto a otro. También es útil como refacción en equipos de electrónica y juguetes. La cantidad de flujo que puede mover es de 80 a 120 litros por hora.

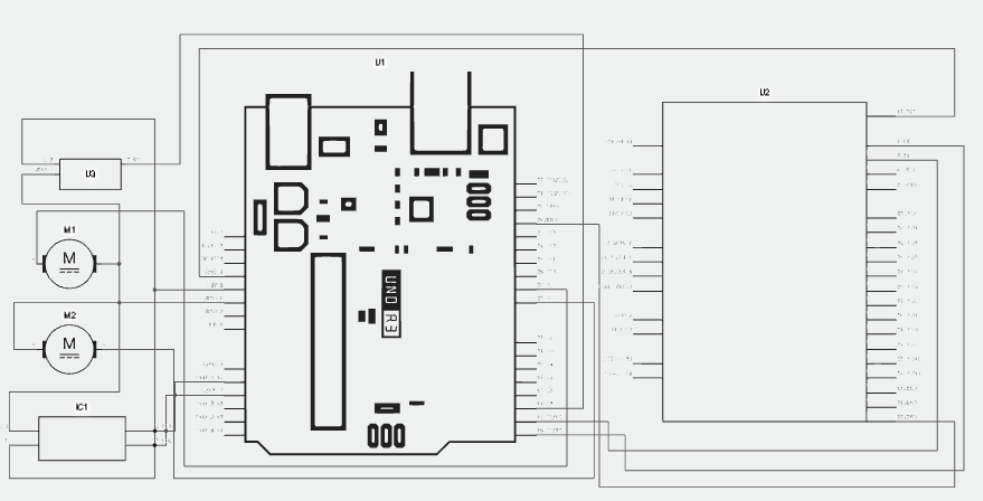


Figura 6. Diagrama electrónico de los sensores y componentes electrónicos (M1 y M2 como bombas, tarjeta microcontrolador, dispositivo de comunicación bluetooth, sensor de temperatura y sensor de profundidad)

Figura 7. Bomba de agua

Características de la bomba

- Voltaje de entrada: 2,5 a 6 Vcc
- Corriente: 130 a 220 mA
- Flujo: 80 a 120 l/h* Voltaje de entrada: 2,5 a 6 V - ⎓
- Corriente: 130 a 220 mA
- Flujo: 80 – 120 l/h
- Consumo: 0,4 a 1,5 W

- Altura máxima de bombeo: 1 m
- Tubo conector: OD: 7,5 mm / ID: 4,85 mm
- Entrada de agua: Diámetro de 5 mm

2.6 Datos experimentales

2.7

2.7.1 Inmersión:

Tabla 2. Tabla de datos calculados teóricos en relación de la cantidad de agua (L) con relación al tiempo (min). Datos teóricos

Tiempo (min)	Litros (L)
1.25	0.25
3	0.5
4.53	0.75
6.35	1
7.17	1.25
9.53	1.5
9.9	1.75
11.2	2

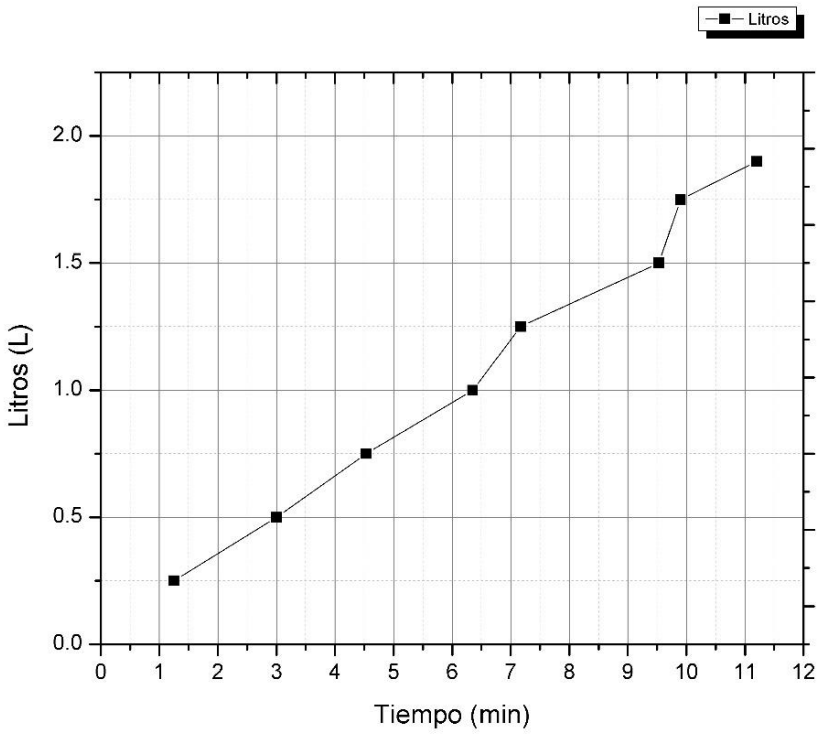


Figura 8. Gráfica de relación de la cantidad de agua con relación al tiempo en inmersión

2.7.2 Emersión:

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 11, pp. 139 - 153.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Tabla 3. Tabla de emersión con datos calculados teóricos

Litros	Tiempo con flujo min. 80 L-H	Tiempo con flujo máximo 120 L-H
(L)	(min)	(min)
0.25	11.4	7
0.5	22.8	15
0.75	33.6	22.8
1	45	30
1.25	56.4	37.8
1.5	67.8	45
1.75	78.6	52.8
2	85.8	57

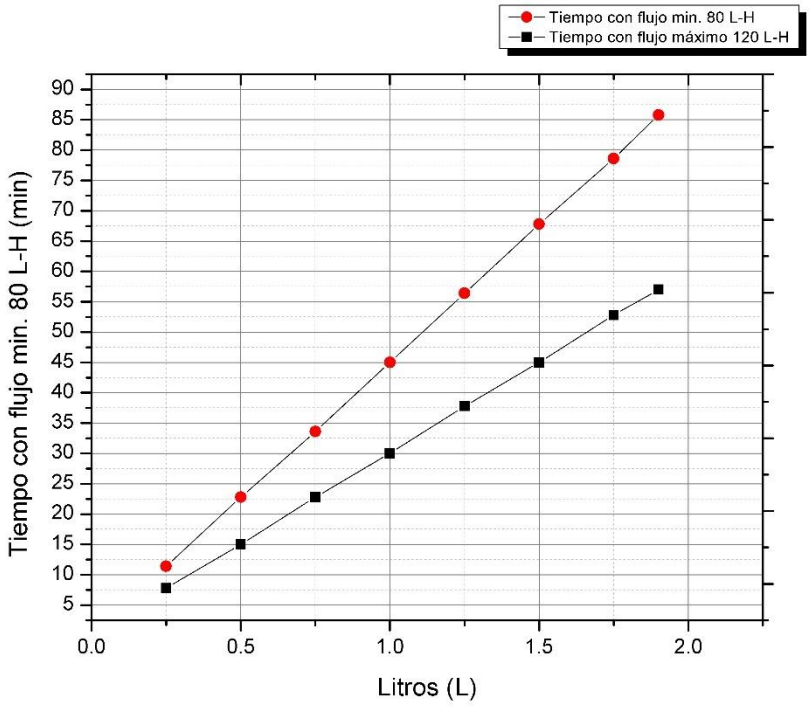


Figura 9. Tiempo de vaciado con relación a la emersión, datos teóricos.

3. Resultados

Aunque estos cálculos proporcionan una buena estimación, hay otros factores que podrían afectar el tiempo de emersión, como la eficiencia de la bomba bajo presión, las pérdidas de carga en el sistema de tuberías y la resistencia del agua a medida que el sistema asciende.

El tiempo estimado para que el sistema de lastre cilíndrico haga emersión desde una profundidad de 3 metros usando la bomba especificada estaría en un rango entre 0.95 minutos y 1.43 minutos aproximadamente, dependiendo de la tasa de flujo real de la bomba en esas condiciones específicas. Sin embargo, en la práctica los resultados fueron diferentes, esto puede ser debido a que existen otras variables externas lo que nos lleva a obtener las diferencias en la inmersión, Figura 5, y los datos de la emersión, ilustración 6, como se observa a continuación.

3.1 Datos experimentales

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 11, pp. 139 - 153.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

3.1.1 Inmersión:

Tabla 4. Tabla de datos en relación de la cantidad de agua (L) con relación al tiempo (min)

Tiempo (min)	Litros (L)
0.4	0.25
1.23	0.5
1.53	0.75
2.35	1
3.17	1.25
3.53	1.5
4.2	1.75
5.5	2

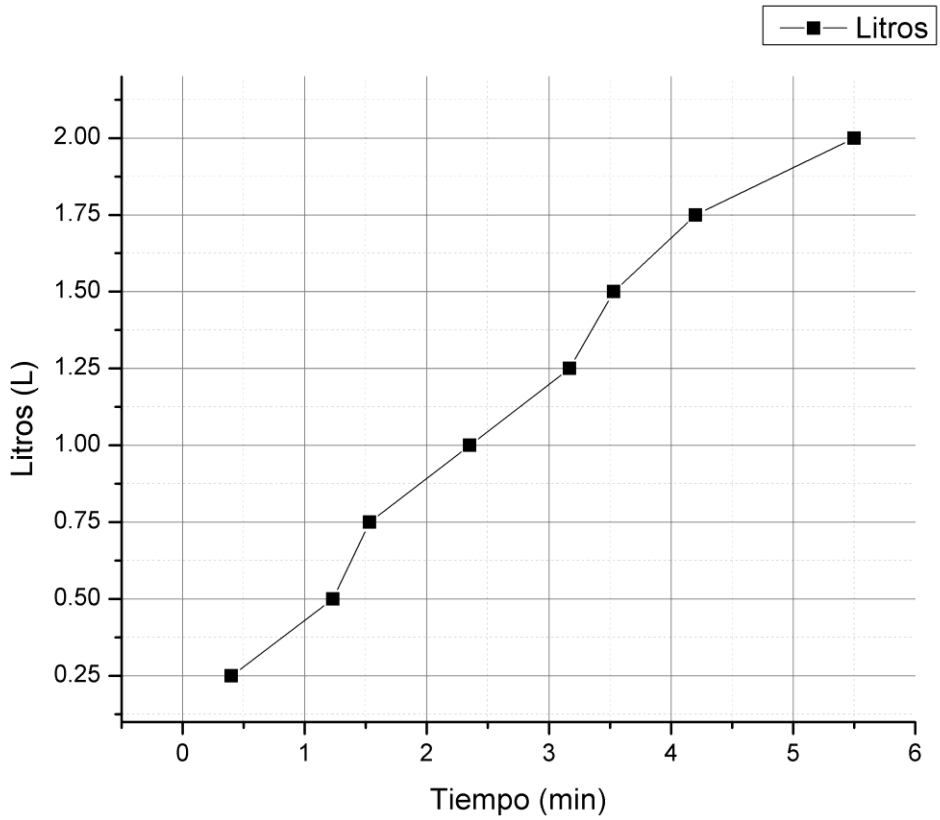


Figura 10. Gráfica de relación de la cantidad de agua con relación al tiempo en inmersión

3.1.2 Emersión:

Tabla 5. Tabla de datos con relación al tiempo de vaciado

Tiempo	Litros

(min)	(L)
7.8	0.25
15	0.5
25	0.75
35	1
42	1.25
47	1.5
55	1.75
57	2

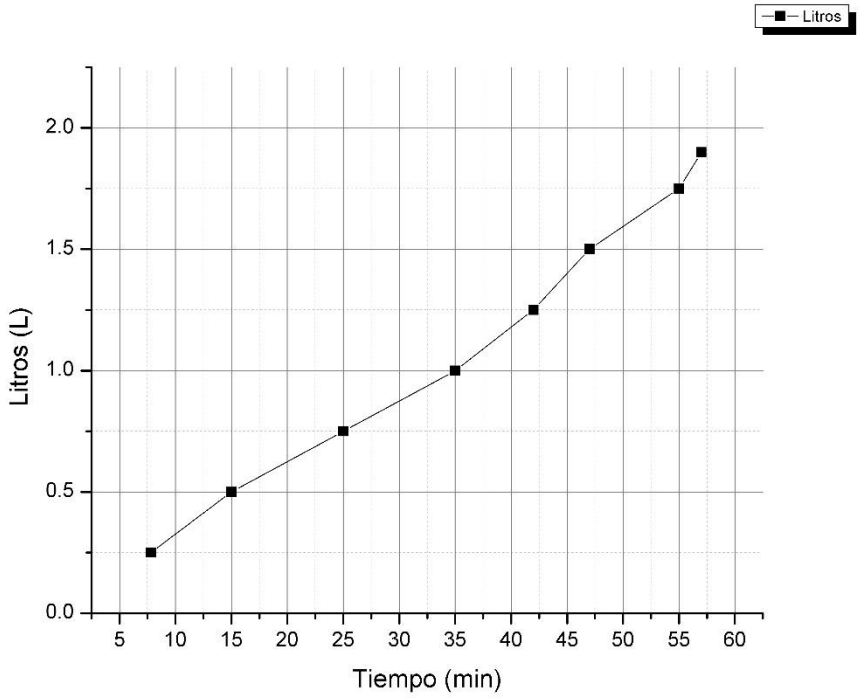


Figura 11. Tiempo de vaciado con relación a la emersión.

4. Conclusiones

El presente trabajo ha demostrado avances significativos en el diseño y análisis de sistemas de investigación acuática que buscan minimizar la perturbación en los entornos naturales donde se realizan los estudios. A lo largo del proceso, se observaron mejoras considerables en comparación con investigaciones previas que empleaban sistemas de inmersión con motores en posición vertical, los cuales generaban vórtices que alteraban el entorno y, en consecuencia, comprometían la confiabilidad de los datos obtenidos. Este desafío fue uno de los principales motivos que impulsaron la propuesta de un sistema de lastre, el cual se ha sometido a rigurosas pruebas de simulación utilizando los softwares SolidWorks y Comsol. Dichas simulaciones permitieron validar el funcionamiento del sistema y reducir el margen de error al comparar los datos calculados con los resultados observados en la implementación práctica del diseño.

La investigación aquí presentada no solo subraya la importancia de continuar con el desarrollo de tecnologías que preserven la integridad del entorno acuático, sino que también marca un punto de partida para futuras investigaciones en diversos cuerpos de agua como ríos, lagos, y eventualmente, mares y océanos. En este sentido, se vuelve esencial seguir proponiendo y desarrollando soluciones que permitan el estudio de estos entornos sin alterarlos significativamente. El sistema de lastre ha

mostrado ser una alternativa viable para este propósito, pero aún existen muchos aspectos que pueden ser mejorados y optimizados.

Una de las direcciones clave para trabajos futuros radica en la implementación de un sistema de control más avanzado, capaz de manejar de manera precisa el movimiento vertical del dispositivo de inmersión. Para lograr esto, se propone la integración de un sistema de control basado en PID (Proporcional-Integral-Derivativo), que permitiría un control más fino y estable de la profundidad y la posición del dispositivo en el agua, sin depender de motores que generen perturbaciones indeseadas en el medio acuático. Este sistema PID podría monitorear variables como la presión y la flotabilidad, ajustando el sistema de lastre de forma automática para mantener una inmersión controlada y precisa, lo que mejoraría tanto la recolección de datos como la estabilidad del dispositivo en entornos dinámicos como mares u océanos.

Además de esto, el uso de sensores avanzados y técnicas de inteligencia artificial podría permitir una adaptación en tiempo real a las condiciones del entorno, optimizando el control del dispositivo en función de factores como corrientes o la variación de la densidad del agua en distintas profundidades.

En cuanto a las simulaciones, sería valioso continuar mejorando la precisión y el alcance de las mismas, explorando no solo el comportamiento del sistema en condiciones estáticas, sino también en escenarios dinámicos más complejos, que incluyan la interacción con diferentes tipos de corrientes y la respuesta del sistema a distintos cambios ambientales.

Finalmente, se sugiere que trabajos futuros también se enfoquen en la optimización energética del sistema, buscando fuentes de energía alternativas y sustentables que permitan una operación prolongada en condiciones de campo, así como en la miniaturización y mejora de la resistencia de los componentes para facilitar su uso en ambientes extremos y profundos.

En conclusión, este trabajo es un avance significativo en el diseño de sistemas de investigación acuática con baja perturbación ambiental, pero aún queda un amplio margen para la incorporación de tecnologías avanzadas de control y automatización, lo que sin duda abrirá nuevas posibilidades para la exploración y el estudio detallado de ecosistemas acuáticos en condiciones naturales.

Referencias

[1]. Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications (4th ed.). McGraw-Hill Education.
[2]. Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., & Huebsch, W. W. (2013). Fundamentals of Fluid Mechanics (7th ed.). John Wiley & Sons.
[3]. Knutsen, O. (2010). Buoyancy and Stability in Ships and Submarines. Journal of Marine Science and Application, 9(4), 401-414.
[4]. Steren Electronics. (n.d.). Micro Bomba de Agua - Flujo de 80-120 L/h 5 mm. Steren.
[5]. Barrales Romero, M. E. Diseño y construcción de un minisubmarino explorador, equipado con un sistema de lastre.
[6]. Fossen, T. I. (1991). *Nonlinear modelling and control of underwater vehicles*. Universitetet i Trondheim (Norway).
[7]. Imlay, F. H. (1961). *The complete expressions for added mass of a rigid body moving in an ideal fluid* (No. Report 1528).
[8]. Flores-Mena, J. E., García-Sánchez, P., & Ramos, A. (2024). Induced-charge electrophoresis of a tilted metal nanowire near an insulating wall. *Physical Review E*, *109*(4), 045109.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 12, pp. 154 - 167.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Modelo Discreto para Emular un Control en Modo Corriente Pico con HIL de Baja Latencia

López Molina Edgar, Sámano Ortega Víctor Manuel, Martínez Nolasco Juan José(✉), Martínez Nolasco Coral y Santoyo Mora Mauro.

Tecnológico Nacional de México en Celaya,
Antonio García Cubas, Pte #600 esq. Av. Tecnológico, Celaya, Gto. México.
✉juan.martinez@itcelaya.edu.mx (corresponding author)

Resumen

Las ventajas de la simulación en tiempo real Hardware in the Loop (HIL) en conjunto con los costos elevados del hardware dedicado a esta técnica han promovido el desarrollo de aplicaciones HIL de bajo costo. Sin embargo, el hardware utilizado en plataformas HIL de bajo costo tiene la desventaja de que con él solo se alcanzan latencias relativamente bajas en comparación con plataformas HIL comerciales. Con esta limitante no es viable emular modelos conmutados a alta frecuencia como convertidores electrónicos de potencia con lazos de control en modo corriente pico (CMCP[vs1]). En este artículo se propone un modelo discreto para la simulación de un convertidor Buck con CMCP mediante la técnica HIL con hardware de baja latencia. El modelo propuesto aproxima, mediante un modelo promedio, el comportamiento de la corriente del inductor del Buck cuando se emplea un lazo de CMCP. El modelo propuesto se comparó, mediante simulación, con un Buck con CMCP obteniendo respuestas para la corriente del inductor y el voltaje del capacitor morfológicamente similares y prácticamente iguales en términos de tiempo y estado estable. Sin embargo, se observó que el modelo propuesto genera oscilaciones en la respuesta transitoria de mayor amplitud. A pesar de las diferencias el modelo propuesto permite emular el lazo de CMCP con hardware de baja latencia.

Palabras clave: Control en modo corriente pico (CMCP), hardware de baja latencia, modelo discreto, modelo promedio.

Abstract

The advantages of real-time Hardware in the Loop (HIL) simulation together with the high costs of dedicated hardware for this technique have promoted the development of low-cost HIL applications. However the hardware used in low-cost HIL platforms has the disadvantage that it only achieves relatively low latencies compared to commercial HIL platforms. With this limitation it is not feasible to emulate high-frequency switched models such as power electronic converters with peak current mode control loops (CMCP). In this article a discrete model is proposed for the simulation of a Buck converter with CMCP using the HIL technique with low-latency hardware. The proposed model approximates using an average model the behavior of the Buck inductor current when a CMCP loop is used. The proposed model was compared by simulation with a Buck with CMCP obtaining responses for the inductor current and the capacitor voltage that are morphologically similar and practically the same in terms of time and steady state. However it was observed that the proposed model generates oscillations in the transient response with a higher amplitude. Despite the differences the proposed model allows emulating the CMCP loop with low latency hardware.

Keywords: Peak current mode control (CMCP), low-latency hardware, discretized model.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 12, pp. 154 - 167.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

1. Introducción

Actualmente en México y el mundo se están buscando alternativas para disminuir las emisiones de gases al ambiente. De acuerdo con el fondo mundial para la naturaleza, WWF por sus siglas en inglés, el uso de materias primas utilizadas para la generación de energía eléctrica como el gas, petróleo o carbón y combustibles fósiles son responsables del 90% de las emisiones de dióxido de carbono y otros gases contaminantes al ambiente, en México el sector del transporte es responsable del 26.2% de dichas emisiones, el sector de la energía es responsable de aproximadamente el 73.2% de las emisiones, en esta clasificación podemos incluir la energía utilizada en la industria y construcciones, así como el transporte responsable de aproximadamente un 16.2% de las emisiones totales [1][vs2]. Por esta razón sistemas energéticos limpios como las micro-redes y los autos eléctricos representan una alternativa para la reducción y/o eliminación de estas emisiones han ganado popularidad recientemente [2], [3].

En cuanto a los vehículos eléctricos estos se conforman por tres partes esenciales, que pueden variar entre cada tipo de vehículo de acuerdo a sus características específicas. Las partes de este tipo de vehículos son una fuente de energía, las más comunes son las baterías, convertidores electrónicos de potencia ya sea para aumentar o mantener un nivel de voltaje especifico o incluso utilizar distintos tipos de convertidores para incluir inversores, los motores eléctricos utilizados pueden ser de distintos tipos y esto afectara el tipo de convertidor utilizado [4], [5], [6]. Los diferentes sistemas de un vehículo requieren niveles de voltaje variados, además algunos componentes requieren el uso de DC y algunos otros AC, es posible utilizar distintos tipos de convertidores de acuerdo con el tipo de conversión necesaria, así como los niveles de voltaje [7]. Por otro lado, una micro-red se compone de cinco elementos básicos conectados a un bus de potencia común: generadores distribuidos, dispositivos de almacenamiento de energía, interconexión con la red utilitaria, cargas y una unidad de control [8].

Tanto en los vehículos eléctricos como en las micro-redes los convertidores electrónicos de potencia (CEP) desempeñan una función esencial, pues éstos aportan control y flexibilidad en general ya que fungen como interfase entre los diferentes elementos de los sistemas y el bus de distribución de energía. Los convertidores utilizados son muy variados, entre los distintos tipos utilizados podemos encontrar los inversores de fuente de impedancia o “z-source inverter” que son considerados altamente eficientes y pueden trabajar en distintos modos como pueden ser Buck o Boost con la ventaja de poder utilizarse de forma bidireccional para intercambiar energía entre fuentes de AC y DC, sin embargo, no es apto para aplicaciones regenerativas [5], [9]. Los convertidores DC-DC más básicos como Buck, Boost, CUK y Buck-Boost también son utilizados en este tipo de vehículos [10], este tipo de convertidores pueden mejorar su eficiencia aumentando la cantidad de fuentes de voltaje o agregando más ramas a este tipo de convertidores, sin embargo, esto a su vez provoca un aumento en la complejidad del circuito aumentando el número de semiconductores.

De acuerdo con [11] “las técnicas de control para convertidores DC-DC se clasifican en dos grandes grupos control en modo corriente (CCM) y control en modo voltaje (VCM)”, el VCM es una técnica básica de fácil diseño e implementación que consiste en un laso de realimentación conectado a un voltaje de referencia, el CCM contiene dos lazos de realimentación incluyendo corriente y voltaje, la señal de error se genera comparando el voltaje de salida con un voltaje de referencia y se utiliza para generar una señal de control que se compara con la corriente del inductor para generar un PWM. El control en modo corriente consiste en dos lazos de realimentación y su implementación puede ser muy variada, el objetivo de aplicar este tipo de control es mejorar la respuesta dinámica del sistema, además de tener algunas ventajas como protección contra corto circuito, una desventaja del método es la necesidad de agregar una rampa de compensación para evitar la desestabilización del sistema cuando trabaja con ciclos de trabajo mayores al 0.5 [12], la rampa de compensación ayuda a filtrar los subarmonicos generados, la compensación se puede realizar en la corriente de pico o corriente de valle que está relacionado con el punto en donde la corriente alcanza su valor máximo o mínimo, en [13] se presentan distintas topologías para la aplicación del control en modo corriente para conducción en modo continuo.

Una técnica viable y económica, para el diseño y validación de sistemas energéticos, sus partes y sus controladores es la simulación en tiempo real Hardware in the Loop (HIL). Esta técnica permite

evaluar una amplia gama de condiciones de operación de sistemas energéticos, depurar y optimizar controladores, así como contribuir a la revisión de la viabilidad de los componentes eléctricos de un sistema [14], [15]. Sin embargo, el costo de las plataformas dedicadas a simulaciones HIL ha promovido la implementación de esta técnica con hardware de relativamente baja latencia como FPGAs [16], procesadores digitales de señales [17] o tarjetas de desarrollo Arduino [18]. Aunque el uso de hardware como este representa una alternativa más económica tiene la desventaja de que con él no pueden emular fenómenos de como el CMCP dada su baja latencia [19].

En este artículo se propone un modelo que emula el comportamiento de un CMCP para su empleo en simulaciones HIL con hardware de baja latencia. La propuesta se basa en el modelo promedio del convertidor para aproximar el comportamiento de la corriente del inductor cuando el Buck incluye un lazo de CMCP. Con este modelo es posible emular un fenómeno que requiere hardware de alta latencia con una alternativa más económica.

2. Marco teórico

Los convertidores electrónicos de potencia (CEP) se representan con diferentes modelos, entre los que destacan modelos conmutados, modelos promedio, de secuencia positiva, fasores dinámicos y basados en datos. El tipo de modelo empleado sirve para el análisis de diversos aspectos, los modelos conmutados son los más detallados, y también los que consumen más recursos computacionales para su solución, mientras que los modelos promedio se pueden dividir en análisis de perturbaciones pequeñas o grandes para analizar la estabilidad del sistema [20].
En este artículo se analizan los modelos promedio y conmutado de un convertidor reductor (Buck). En la figura 1 se muestra el diagrama de un convertidor Buck conformado por una fuente de voltaje v_{in}, un inductor (L) con una resistencia asociada (r), un capacitor C, un diodo de acción rápida, un transistor que se funciona como interruptor de potencia (Q) y una carga resistiva R; adicionalmente q representa la señal de conmutación de Q si $q = 1$ Q está cerrado mientras que si $q = 0$ Q está abierto.

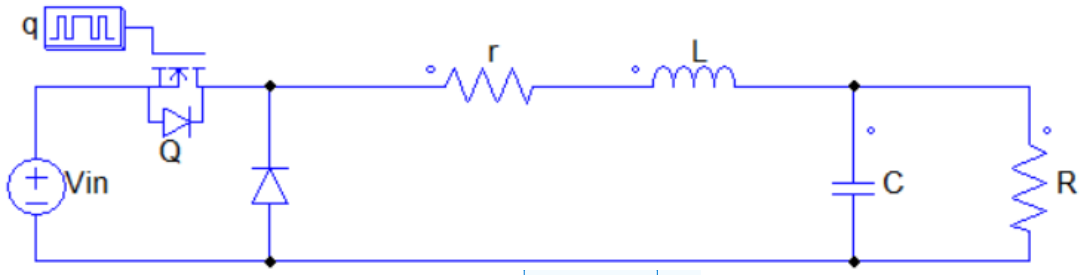


Figura 1. Circuito del convertidor[vs3] tipo Buck.

2.1 Modelo en espacio de estados

El modelado en el espacio de estados permite obtener un número n de ecuaciones diferenciales ordinarias de las variables de estado, es decir aquellas variables a través de las cuales se describe completamente la evolución del sistema después de un tiempo t siempre y cuando se conozcan los valores de las entradas del sistema. En este modelo el sistema se describe en términos de un vector de entradas u, un vector de salidas y así como un vector correspondiente a las variables de estado x [21], como se muestra en (1):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f(x,u,t) \\ \dot{x}_2 &= f(x,u,t) \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= f(x,u,t) \end{aligned} \tag{1}$$

La forma de expresar las variables de estado en su forma vectorial seria la mostrada en (2):

$$\dot{x} = [\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_n]^T \quad (2)$$

El vector de entradas se representa en (3):

$$u = [u_1, u_2, \dots, u_r]^T \quad (3)$$

Es importante mencionar que el tamaño de los vectores que representan las variables de estado, las entradas y las salidas pueden ser diferentes. La forma compacta de representar el modelo en espacio de estados de forma matricial se muestra en (4): en donde el coeficiente A representa una matriz de dimensiones $n * n$ que contiene coeficientes de valores constantes que describen al sistema mientras que B es una matriz de dimensiones $n * r$ que contiene los pesos de las entradas para cada uno de los estados.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4)$$

Las ecuaciones de salida comúnmente se escriben en forma matricial (5) similar a las variables de estado en donde y representa al vector columna de las variables de salida, C representa una matriz de coeficientes constantes con los pesos de las variables de estado y D representa una matriz de coeficientes con los pesos de las entradas, es común que los coeficientes de la matriz D sean nulos y por tanto se elimine este término en (5).

$$y = Cx + Du \quad (5)$$

2.2 Modelo conmutado

La técnica de modulación de ancho de pulso PWM se utiliza la para la activación/desactivación de los interruptores del circuito de un CEP generando distintos casos de operación en función de si los interruptores se encuentran abiertos o cerrados. El modelo conmutado de un CEP se obtiene con las ecuaciones en espacio de estados del convertidor al analizar cada uno de los posibles casos. Dependiendo del modo de conducción en el que trabajan los elementos pasivos del convertidor se tienen distintos modos de operación: en el modo de conducción continua (MCC), la corriente almacenada en el inductor durante su descarga nunca alcanza el valor de cero, por lo que solamente se tienen dos casos posibles, carga y descarga del inductor, mientras que en el modo de conducción discontinua (DCM) la corriente en el inductor alcanza el valor de cero y permanece sin carga durante algún intervalo de tiempo [22], esto produce un tercer caso. La corriente del inductor para los diferentes modos de conducción se presenta en la figura 2.

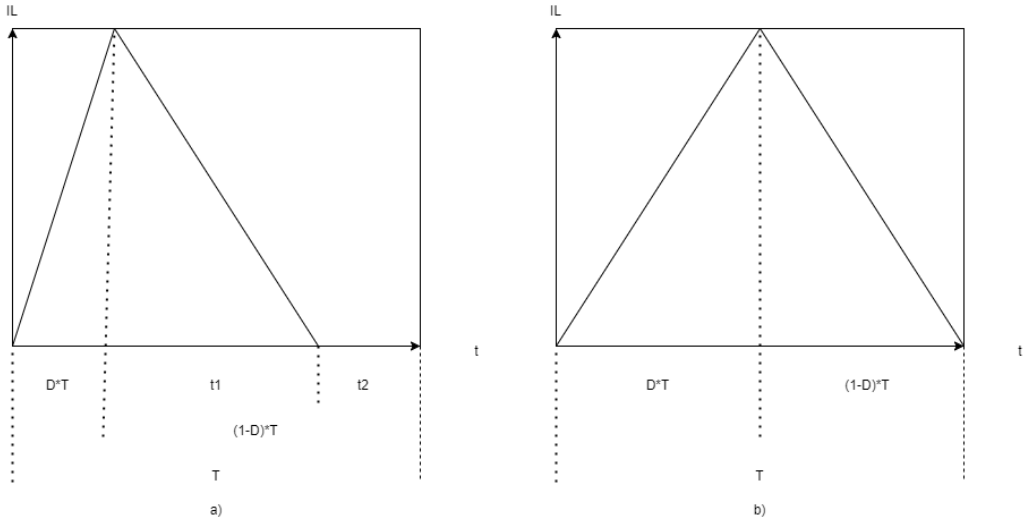


Figura 2. Modos de conducción de los convertidores a) DCM, b) MCC.

Para este estudio se considera que el convertidor opera en modo continuo por lo que se tienen solo dos posibles casos a modelar. Para modelar el CEP se realiza la representación de su circuito en función del estado del interruptor (Q), la figura 3 muestra el circuito para la carga del inductor ($q = 1$) y la figura 4 muestra el circuito para la descarga del inductor ($q = 0$). Para ambos casos se seleccionan como variables de estado la corriente del inductor (i_L) y el voltaje del capacitor, que coincide con el voltaje de salida (v_o), estas variables son suficientes para representar el comportamiento del circuito en cualquier instante de tiempo.

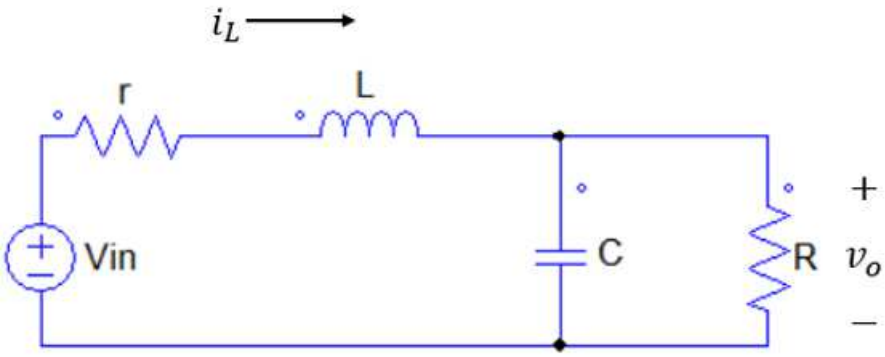


Figura 3. Circuito para la carga del inductor, interruptor Q cerrado.

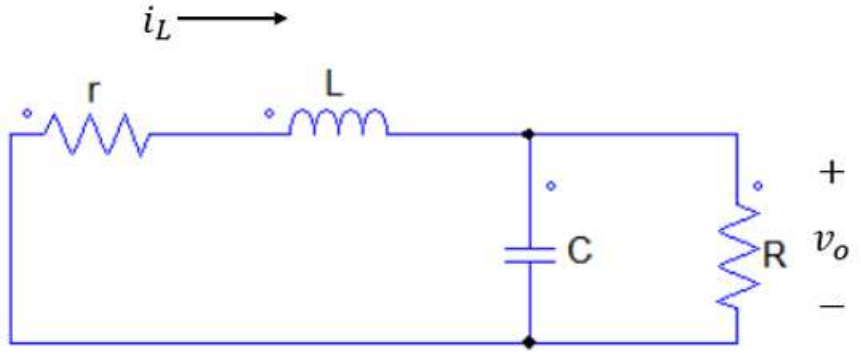


Figura 4. Circuito para la descarga del inductor, interruptor Q abierto.

Utilizando los circuitos equivalentes de la carga y descarga del inductor se aplica la ley de voltajes de Kirchoff para encontrar la ecuación de estado de la corriente del inductor (6), (8) y la ley de corrientes de Kirchhoff para encontrar la ecuación de estado del voltaje de salida (7), (9) [23].

$$q = 1 \qquad i_L * r + L\frac{di_L}{dt} + v_o = v_{in} \tag{6}$$

$$i_L = C\frac{dv_o}{dt} + \frac{v_o}{R} \tag{7}$$

$$q = 0 \qquad i_L * r + L\frac{di_L}{dt} + v_o = 0 \tag{8}$$

$$i_L = C\frac{dv_o}{dt} + \frac{v_o}{R} \tag{9}$$

Para que las ecuaciones coincidan con la forma establecida en (4) y (5) se reordenan los términos y se obtiene la expresión (10). Además, considerando que las salidas del sistema sean las mismas variables de estado se obtiene (11). Como se observa en (10) el modelo del CEP cambia (o conmuta) en función del valor que toma q, esta es la principal característica del modelo conmutado.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & -1 \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} [v_{in}] \quad ; \quad q = 1 \\ \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & -1 \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} [v_{in}] \quad ; \quad q = 0 \end{cases} \tag{10}$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \end{bmatrix} \tag{11}$$

2.3 Modelo promedio

El modelo promedio se obtiene a partir del modelo conmutado haciendo un promedio, durante un periodo de conmutación, de las ecuaciones obtenidas de los circuitos de carga y descarga del inductor. En este caso se introduce la variable de control D que hace referencia al ciclo de trabajo, al considerar que el convertidor funciona a una frecuencia fija, los tiempos de activación T_{ON} y desactivación T_{OFF} del interruptor deben sumar el periodo T de la frecuencia establecida por lo que podemos obtener la relación de los tiempos con el ciclo de trabajo como se muestra en (12)-(13).

$$T_{ON} = DT \tag{12}$$
$$T_{OFF} = (1 - D)T \tag{13}$$

De forma que si se denota con A_{ON} a la matriz A de (10) cuando $q = 1$ y A_{OFF} a la matriz A[vs4] de (10) cuando $q = 0$. La matriz promedio $\hat{A}$ durante un periodo, que corresponde a la matriz A del modelo promedio, se obtiene como se muestra en (14); la misma ecuación aplica para las matrices B, C y D.

$$\hat{A} = \frac{A_{ON}DT + A_{OFF}(1-D)T}{T} = A_{ON}D + A_{OFF}(1 - D) \tag{14}$$

Aplicando (14) a las matrices A y B del modelo conmutado (10) se obtiene el modelo promedio del CEP como se muestra en (15).

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & -1 \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix} [v_{in}] \tag{15}$$

2.4 Control en modo corriente pico

La estructura del controlador de un CEP típicamente consiste en dos lazos de control anidados, un lazo externo de voltaje en donde se compara el voltaje de salida con un valor de referencia y se hace pasar por un controlador que suele ser P, PI o PID [10], [24] (en este estudio se utilizó un controlador PI) para generar una señal de referencia i_L^* que es afectada por una rampa de compensación antes de ser comparada con la corriente del inductor i_L para generar una señal PWM que definirá el ciclo de trabajo del CEP. En la figura 5 se muestran esta estructura de control (a) y su modo de operar (b) [13].

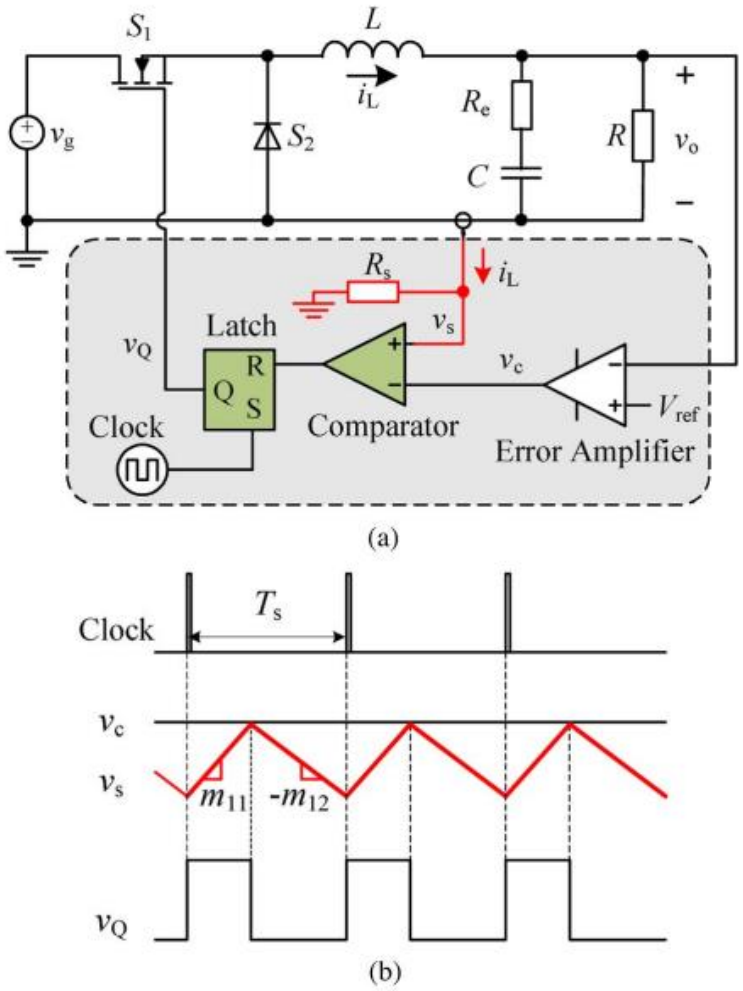


Figura 5. Esquema de aplicación del control en modo corriente y su modo de operar. Tomada de [12]

Al considerar un control en modo corriente pico es necesario implementar una rampa de compensación para eliminar variaciones producidas por subamórnicos de la señal moduladora, en [13] se presentan los usos de las rampas de compensación con corriente pico y corriente de valle, la figura 6 muestra cómo es el uso de estas rampas de compensación. Los posibles casos que se muestran integran una rampa de compensación en azul, un aumento en la corriente mostrado por la línea roja y una disminución de la corriente en amarillo. En este estudio la compensación se realiza con corriente pico.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 12, pp. 154 - 167.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

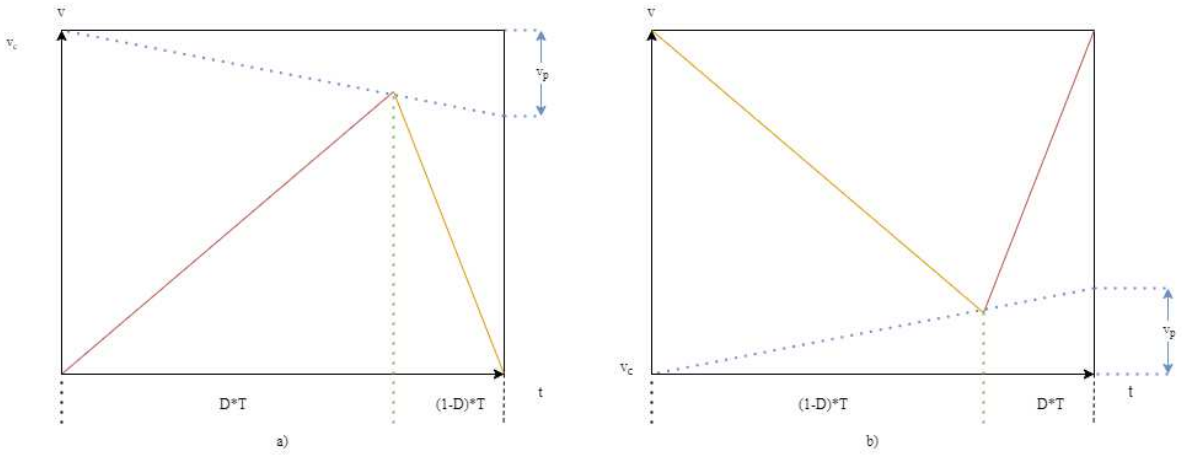


Figura 6. Rampa de compensación a) compensación con corriente pico, b) compensación con corriente de valle.

La amplitud de la rampa de compensación tendrá un valor específico en función de las condiciones de operación del CEP. En (16) se presentan la ecuación para encontrar el valor pico v_P de la rampa para un convertidor Buck: donde D representa el ciclo de trabajo en estado estable para conseguir el voltaje de salida deseado, T representa el periodo de la frecuencia de conmutación del CEP, L representa el valor del inductor y v_{in} representa el voltaje de entrada del convertidor [25].

$$v_P = \frac{(D-0.18)*T*v_{in}}{L} \tag{16}$$

3. Desarrollo

3.1 Discretización del modelo promedio

Las variables de estado definidas para el modelo del Buck son la corriente en el inductor i_L y el voltaje en el capacitor, que es igual al voltaje de salida v_o o voltaje en la carga resistiva R. El modelo promedio se discretizó para su simulación utilizando el método de forward Euler en donde la derivada tiene la forma mostrada en (17), sustituyendo (17) en (15) se obtienen ecuaciones con los valores actual y futuro de las variables, al reordenar los términos y realizar un corrimiento en el tiempo hacia atrás se obtienen las ecuaciones (18) y (19).

$$\frac{dx}{dt} = \frac{x(k+1)-x(k)}{T} \tag{17}$$

$$i_L(k) = \left[(1-\frac{TrL}{L}) * i_L(k-1) - \frac{T}{L}v_o(k-1) + \frac{T}{L}D(k-1)v(k-1)\right] \tag{18}$$

$$v_o(k) = \frac{T}{C}\left[\left(1-\frac{1}{RL}\right) * v_o(k-1) + i_L(k-1)\right] \tag{19}$$

3.2 Aproximación al control en modo corriente pico

Como se mencionó en la introducción el uso de hardware de bajo costo limita las capacidades de una plataforma HIL para emular fenómenos de alta latencia. Típicamente las frecuencias de conmutación de un CEP están en el orden de los kHz y como se evidencia en las figuras 5 b) y 6 el CMCP implica una acción de control sobre el CEP que depende de su modelo conmutado. Sin embargo, emular el modelo conmutado de un CEP implica resolver las ecuaciones presentadas en (10) en repetidas ocasiones durante un periodo de la frecuencia de conmutación del CEP. De modo que emular un control en modo corriente pico resulta inviable empleando hardware de baja latencia. Para resolver esta problemática se propone una aproximación del comportamiento de la corriente del inductor en CMCP, figura 7 (a), utilizando su modelo promedio figura 7 (b).

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 12, pp. 154 - 167.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

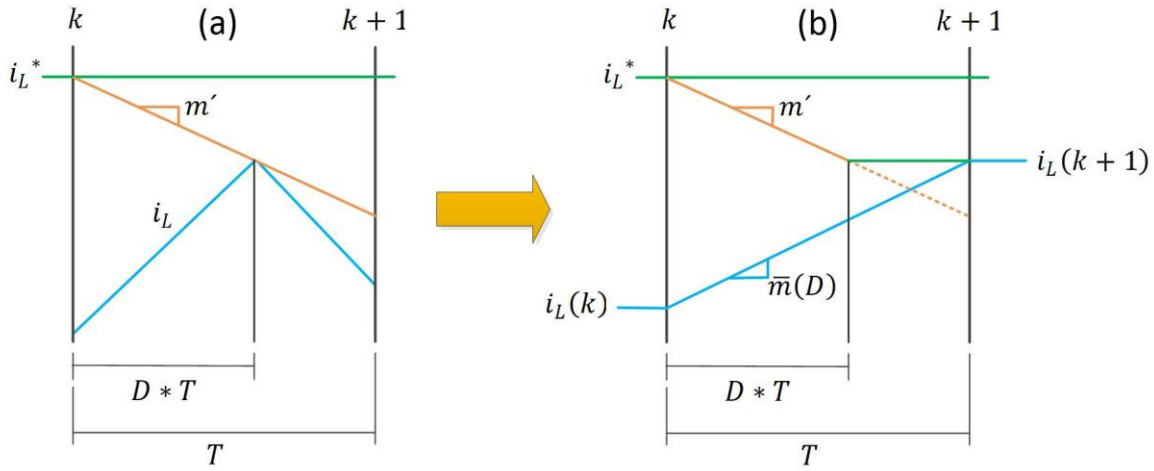


Figura 7. a) Modo de operación de compensación con corriente pico en un modelo conmutado b) Modo de operación de compensación con corriente pico para el modelo promedio propuesto.

En la figura 7 a) la línea naranja representa la rampa de compensación m' mientras que la línea azul representa el comportamiento de la corriente del inductor i_L cuando el CEP incluye un lazo de CMCP, la línea verde continua superior representa la corriente de referencia $i_L{}^*$ generada por el lazo externo de voltaje. En este caso se aprecia que en cada ciclo de reloj la corriente del inductor alcanza una corriente máxima cuando se interseca con la rampa de compensación. Se planteó reproducir este comportamiento utilizando la corriente promedio como se muestra en la figura 7 (b). En la figura 7 (b) la línea azul representa el comportamiento promedio de la corriente del inductor descrito por el modelo discreto entre los instantes k y k+1; esto implica que el periodo de la discretización debe ser igual al periodo de la frecuencia de la conmutación del CEP. La aproximación propuesta supone los siguientes puntos:

- La corriente promedio tiene una pendiente promedio que depende del ciclo de trabajo $\bar{m}(D)$ de acuerdo con (15).
- Dado que la corriente se describe con su modelo promedio su pendiente no cambia de modo que se mantiene durante todo T.
- El comportamiento de la corriente descrita por el modelo conmutado puede aproximarse considerando que la corriente promedio se estabiliza en el punto en el que la rampa de compensación aplicada durante un instante TD llega al valor alcanzado por la corriente promedio al final del periodo de conmutación.

La rampa de compensación tiene una pendiente m' descrita por (20): donde Δi es la amplitud de la rampa descrita en (16).

$$m' = \frac{\Delta i}{T} \tag{20}$$

En el CMCP el pico de la corriente se estabiliza en un valor $i_L|_s$ menor al de referencia ($i_L{}^*$), cuando la corriente se interseca con la rampa de compensación. El valor de $i_L|_s$ se calcula con (21).

$$i_L|_s = i_L{}^* - m'TD \tag{21}$$

Por otro lado, el valor de la corriente en el instante k+1 se describe con (22).

$$i_L(k+1) = i_L(k) + m(D)T \tag{22}$$

Para que la corriente promedio se estabilice en $i_L|_s$ las ecuaciones (21) y (22) se igualan generando (23).

$$i_L(k) + m(D)T = i_L{}^* - m'TD \tag{23}$$

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 12, pp. 154 - 167.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Sustituyendo (20) en (23) y considerando que $m(D) = \frac{di_L}{dt}$ (23) se expresa como se muestra en (24).

$$i_L(k) + \frac{T}{L}[-ri_L(k) - v_o(k) + Dv_{in}(k)] = i_{Lref} - \Delta iD \tag{24}$$

Finalmente, de (24) se despeja D quedando como se muestra en (25). Este valor de D se usa como valor futuro para el modelo presentado en (18) y (19).

$$D(k+1) = \frac{i_{Lref} + \frac{T}{L}v_o(k) - \left(1 - \frac{Tr}{L}\right)i_L(k)}{v_{in}(k) + \Delta i} \tag{25}$$

Una vez que se obtuvo la expresión para obtener el ciclo de trabajo el sistema completo incluyendo el Buck (ecuaciones (18), (19)) un lazo externo de voltaje con un controlador PI y la ecuación (25) para aproximar el control en modo corriente pico se implementó en Simulink. El diagrama de bloques de esta implementación se muestra en la figura 8.

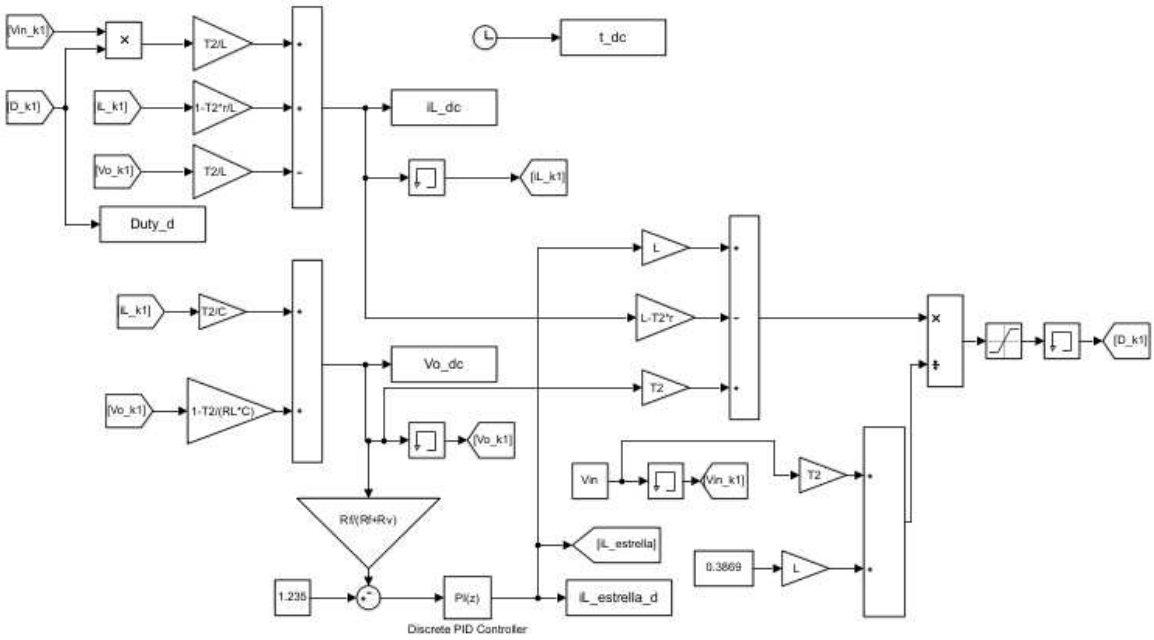


Figura 8. Diagrama de bloques del modelo discreto.

4. Resultados

Para evaluar el desempeño del modelo propuesto su respuesta se comparó con la del modelo conmutado incluyendo un lazo de CMCP. El Buck evaluado tiene una frecuencia de conmutación de 150 kHz lo que implica un tiempo de integración de 6.65 µs para el modelo discreto. En el caso del modelo conmutado, se requiere emplear un selector para seleccionar los modelos de comportamiento de carga y descarga del inductor (6) y (8), la ecuación (7) que presenta el comportamiento del voltaje del capacitor v_o, es la misma para los casos de carga y descarga del inductor por lo que se implementa en ambos casos; el diagrama de bloques de esta implementación se muestra en la figura 9.

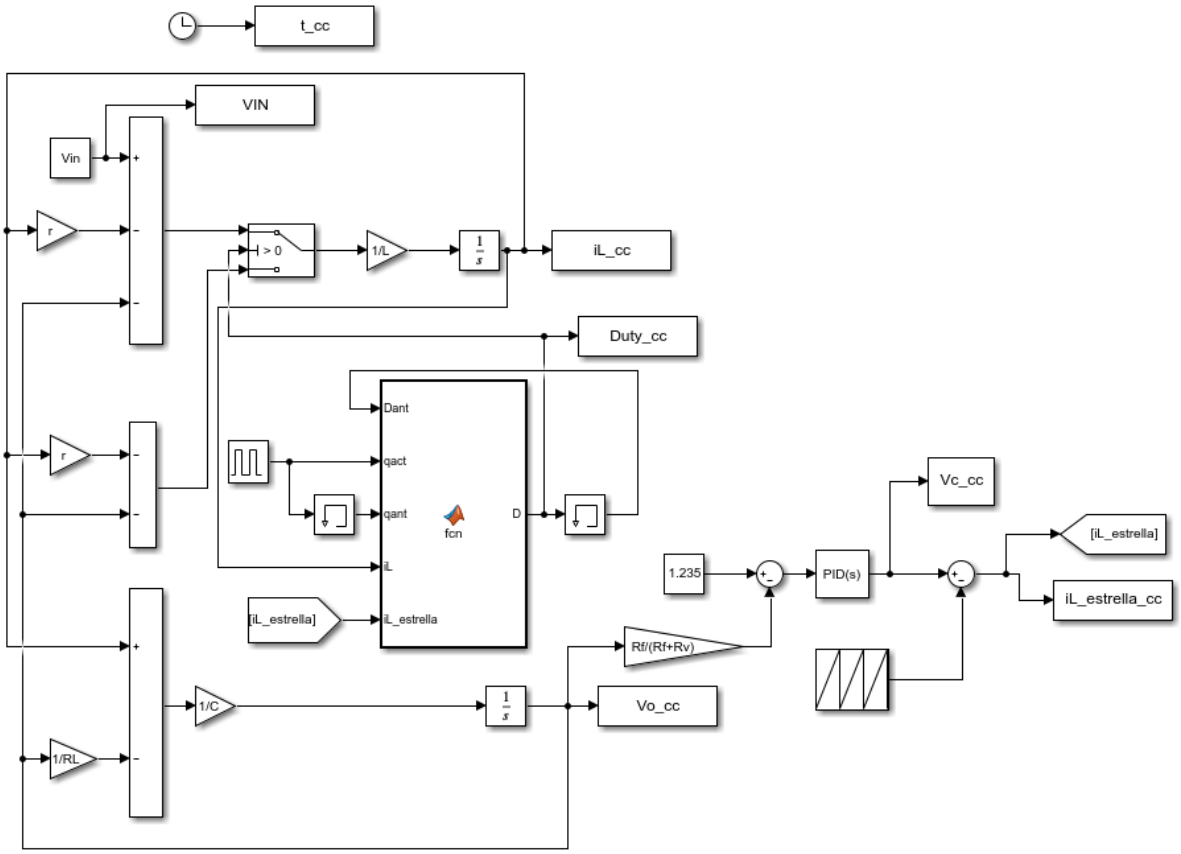
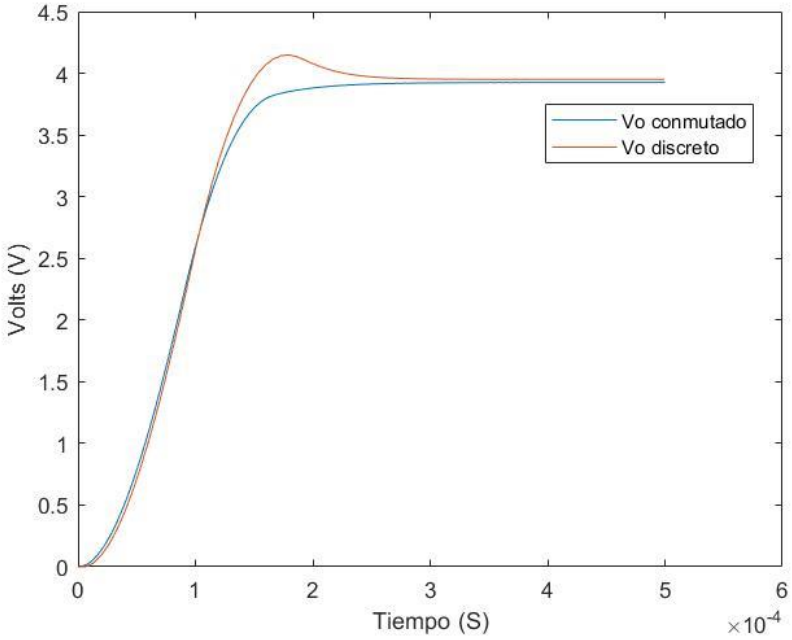


Figura 9. Diagrama de bloques del modelo conmutado.

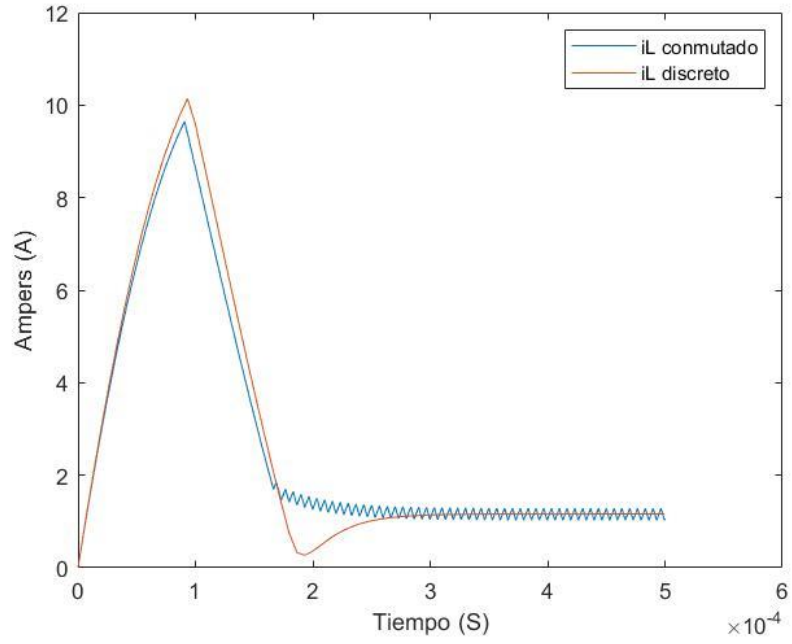
En la Figura 10 (a) se muestra la comparativa del voltaje del capacitor. Por otro lado, en la Figura 10 (b) se muestra la comparativa de la corriente del inductor; en ambos incisos en color azul se muestra la respuesta obtenida con el modelo conmutado y el control en modo corriente pico mientras que la línea naranja representa la respuesta obtenida con el modelo propuesto.

.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 12, pp. 154 - 167.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.



a)



b)

Figura 10. a) Comparación de los resultados de Voltaje de salida, b) Comparación de la corriente del inductor.

5. Conclusiones

Los resultados muestran que el modelo propuesto presenta las mismas características que el modelo discreto en estado estable, sin embargo, el transitorio difiere principalmente en la amplitud de las oscilaciones. Esta diferencia se atribuye a dos aspectos principales:

1. La discretización por si sola introduce un error local al emplear una aproximación a la derivada.

2. El CMCP implementado en el modelo conmutado regula el valor máximo de la corriente del inductor mientras que el modelo propuesto regula el valor promedio. Es decir, con el modelo propuesto se generar valores mayores de corriente promedio en el transitorio, este incremento en el valor de la corriente promueve un incremento en las oscilaciones del voltaje.

A pesar de las diferencias observada en las respuestas, el modelo propuesto produce una salida para el estado transitorio morfológicamente similar a la del CMCP y prácticamente igual en términos de tiempo. Además de que permite su implementación con hardware de baja latencia, que es el principal objetivo de esta propuesta.

Una forma de reducir el error observado en la respuesta producida por el modelo propuesto sería reducir el tiempo de integración del modelo discreto. Sin embargo, el modelo propuesto requiere que el tiempo de la discretización sea igual al periodo de conmutación del convertidor, por lo que esta variable depende del diseño del CEP y no puede modificarse arbitrariamente en el modelo propuesto.

Como trabajo futuro se propone evaluar la respuesta de un CEP físico para comparar el modelo propuesto contra un experimento en lugar de una simulación.

Referencias

[1] H. Ritchie, “Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?,” *Our World in Data*, 2020, Accessed: Aug. 31, 2024. [Online]. Available: https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector

[2] S. Ullah, A. M. A. Haidar, and H. Zen, “Assessment of technical and financial benefits of AC and DC microgrids based on solar photovoltaic,” *Electrical Engineering*, vol. 102, no. 3, pp. 1297–1310, Sep. 2020, doi: 10.1007/s00202-020-00950-7.

[3] R. AhmadiAhangar, A. Rosin, A. N. Niaki, I. Palu, and T. Korõtko, “A review on real-time simulation and analysis methods of microgrids,” Nov. 01, 2019, *John Wiley and Sons Ltd*. doi: 10.1002/2050-7038.12106.

[4] F. Un-Noor, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, M. N. Mollah, and E. Hossain, “A comprehensive study of key electric vehicle (EV) components, technologies, challenges, impacts, and future direction of development,” 2017, *MDPI AG*. doi: 10.3390/en10081217.

[5] K. V. Singh, H. O. Bansal, and D. Singh, “A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components,” Jun. 01, 2019, *Springer Berlin Heidelberg*. doi: 10.1007/s40534-019-0184-3.

[6] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez, and J. M. Marquez-Barja, “A review on electric vehicles: Technologies and challenges,” Mar. 01, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/smartcities4010022.

[7] P. K. Maroti, S. Padmanaban, M. S. Bhaskar, V. K. Ramachandaramurthy, and F. Blaabjerg, “The state-of-the-art of power electronics converters configurations in electric vehicle technologies,” Mar. 01, 2022, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.pedc.2021.100001.

[8] V. K. Sood and H. Abdelgawad, “Microgrids architectures,” in *Distributed Energy Resources in Microgrids: Integration, Challenges and Optimization*, Elsevier, 2019, pp. 1–31. doi: 10.1016/B978-0-12-817774-7.00001-6.

[9] G. Zhang, Z. Li, B. Zhang, and W. A. Halang, “Power electronics converters: Past, present and future,” Jan. 01, 2018, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.290.

[10] K. Balachander, A. Amudha, M. S. Ramkumar, G. Emayavaramban, S. Divyapriy, and P. Nagaveni, “Design and analysis of modified CUK converter for electric hybrid vehicle,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 1691–1695. doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.566.

[11] K. Jyotheeswara Reddy and S. Natarajan, “Energy sources and multi-input DC-DC converters used in hybrid electric vehicle applications – A review,” Sep. 06, 2018, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.07.076.

[12] L. Dixon, “Average Current Mode Control of Switching Power Supplies.”

[13] G. Zhou, J. Xu, and J. Wang, “Constant-frequency peak-ripple-based control of buck converter in CCM: Review, unification, and duality,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 3, pp. 1280–1291, 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2257143.

[14] R. Salcedo *et al.*, “Banshee distribution network benchmark and prototyping platform for hardware-in-the-loop integration of microgrid and device controllers,” *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 8, pp. 5365–5373, Aug. 2019, doi: 10.1049/joe.2018.5174.

[15] G. V. B. Kumar and K. Palanisamy, “Energy management of renewable energy-based microgrid system with HESS for various operation modes,” *Front Energy Res*, vol. 10, Oct. 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.995034.

[16] E. Zamiri, A. Sanchez, M. Yushkova, M. S. Martínez-García, and A. de Castro, “Comparison of different design alternatives for hardware-in-the-loop of power converters,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 10, no. 8, Apr. 2021, doi: 10.3390/electronics10080926.

[17] W. Jiang, L. Sun, Y. Chen, H. Ma, and S. Hashimoto, “A hardware-in-the-loop-on-chip development system for teaching and development of dynamic systems,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 10, no. 7, Apr. 2021, doi: 10.3390/electronics10070801.

[18] Y. Martinez-Armero, S. Lopez-Blandon, and E. Giraldo, “Low-cost Arduino-based Hardware-In-the-Loop Platform for Simulation and Control of Dynamic Systems,” *IAENG Int J Comput Sci*, vol. 50, no. 4, 2023.

[19] L. Estrada, N. Vázquez, J. Vaquero, Á. de Castro, and J. Arau, “Real-time hardware in the loop simulation methodology for power converters using labview FPGA,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 2, 2020, doi: 10.3390/en13020373.

[20] C. Shah *et al.*, “Review of Dynamic and Transient Modeling of Power Electronic Converters for Converter Dominated Power Systems,” 2021, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/ACCESS.2021.3086420.

[21] J. Hussain, “RLC Circuit Response and Analysis (Using State Space Method) Qasim Kamil Mohsin ministry of electricity-iraq RLC Circuit Response and Analysis (Using State Space Method),” 2008. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/266472371

[22] T. Bjažić, Ž. Ban, and M. Milanovičb, “Modeling of current mode controlled boost converter supplied by fuel cell suitable for controller design purposes,” *J Power Sources*, vol. 198, pp. 203–217, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.09.079.

[23] S. Bacha, I. Munteanu, and A. I. Bratcu, “Switched model,” in *Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*, no. 9781447154778, Springer International Publishing, 2014, pp. 27–53. doi: 10.1007/978-1-4471-5478-5_3.

[24] M. İnci, M. Büyük, M. H. Demir, and G. İlbey, “A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects,” Mar. 01, 2021, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2020.110648.

[25] R. Sampath, “Digital Peak Current Mode Control of Buck Converter Using MC56F8527 DSC - Application Notes,” 2013.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 13, pp. 168 - 177.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Sistema de Medición de Ritmo Cardíaco

Hernández Hernández Arturo[1], Becerra Rodríguez María Blanca[2], Zea Pérez José Marcos[1], Dublan Barragán Brenda Santa[1], Mata Donjuan Gloria Flor[1] y Peredo Valderrama Iván[1]

[1]Universidad Politécnica de Querétaro (UPQ)
arturo.hernandez@upq.mx
[2]Tecnológico Nacional de México/I.T. de Querétaro (ITQ)

Resumen

Este artículo describe el desarrollo de un sistema portátil de medición del ritmo cardíaco para choferes de vehículos, con el objetivo de prevenir accidentes relacionados con la fatiga. El sistema mide el ritmo cardíaco del conductor y, mediante un microcontrolador, que procesa la señal para detectar alteraciones, como disminuciones por somnolencia o aumentos por estrés. Ante estas situaciones, se envía una alerta a un dispositivo móvil registrado para contactar al conductor y evitar accidentes. Además, se destaca el potencial de los sistemas portátiles en la medicina, ya que las enfermedades cardiovasculares son la principal causa de muerte a nivel mundial, afectando en gran medida a personas de bajos ingresos. El uso de esta tecnología, combinada con técnicas de procesamiento de datos, permite monitorear el estado de los pacientes en tiempo real, ofreciendo una herramienta útil para mejorar la respuesta médica en emergencias y la calidad de vida general de la sociedad.

Palabras clave: Monitoreo cardíaco, Sistemas portátiles, Prevención de accidentes

1. Introducción

Las enfermedades cardiovasculares son la principal causa de muerte a nivel mundial, afectando a personas de todas las edades, pero especialmente a aquellas de bajos ingresos [1]. Factores de riesgo como el tabaquismo, la obesidad, la inactividad física y el consumo nocivo de alcohol han incrementado la prevalencia de estas enfermedades en la población [2]. A nivel global, se proyecta que estos factores continuarán agravando la situación en los próximos años, lo que hace crucial el desarrollo de tecnologías que permitan una vigilancia médica más eficiente [3].

En este contexto, los sistemas portátiles de monitoreo de la salud han ganado relevancia en la investigación, particularmente por sus aplicaciones en medicina, deporte e industria [4]. Estos dispositivos permiten la recolección continua de datos sobre el estado de los pacientes, brindando información clínica en tiempo real. En situaciones de emergencia, como en el caso de un paciente con una enfermedad cardiovascular, contar con un sistema que proporcione información inmediata y precisa puede mejorar considerablemente el tiempo de respuesta de los servicios médicos [5].

Existe un dispositivo capaz de registrar y almacenar ritmos de electrocardiograma (ECG), permitiendo transferir los datos a software o aplicaciones móviles compatibles para realizar análisis más detallados llamado Monitor de ECG portátil LiVENPaCE 0004. Aunque es una herramienta eficaz para el monitoreo personal, no está clasificado como un dispositivo médico y, por lo tanto, no debe utilizarse con fines de diagnóstico o tratamiento de afecciones médicas. Está diseñado exclusivamente para el bienestar general [6].

Otro dispositivo similar es uno que se conecta a una aplicación gratuita mediante Bluetooth, proporcionando un monitoreo en tiempo real de la frecuencia cardíaca (HR) y del electrocardiograma (ECG) denominado Monitor de frecuencia cardíaca sin correa para deportes. Es ideal para aquellos

que buscan un control continuo durante actividades deportivas, permitiendo mantener un seguimiento detallado de su rendimiento físico [7].

También hay unos dispositivos que funcionan emitiendo luz infrarroja a través de los diodos del sensor hacia las venas del usuario. Al reflejar la luz, el dispositivo mide el nivel de sangre en esa área, que varía con cada latido del corazón llamado Relojes SmartWatch deportivos. Gracias a este proceso, los relojes o pulseras inteligentes son capaces de registrar los latidos por minuto de manera precisa, lo que los convierte en una herramienta eficiente para el monitoreo continuo de la frecuencia cardíaca durante las actividades diarias o entrenamientos [8].

En general, estos dispositivos están diseñados principalmente para el monitoreo de la presión arterial y el ritmo cardíaco, pero no cuentan con la capacidad de enviar alertas automáticas en caso de que se detecten variaciones fuera de los rangos normales.

Este trabajo se centra en el diseño y desarrollo de un sistema de monitoreo del ritmo cardíaco para choferes de vehículos, cuyo objetivo principal es detectar irregularidades en su estado de salud durante la conducción. El dispositivo no solo busca prevenir accidentes provocados por la fatiga o el estrés, sino que también contribuye a la creciente tendencia hacia la adopción de tecnologías portátiles para la mejora de la calidad de vida y la salud [9]. El análisis de grandes volúmenes de datos, mediante técnicas avanzadas como el procesamiento de señales y la minería de datos, ha permitido una efectividad notable en estos sistemas de monitoreo [10], y se explora cómo estas herramientas pueden ser utilizadas para mejorar la seguridad y bienestar de los conductores.

2. Sistema portátil de medición del ritmo cardíaco

2.1 Capacitor

El condensador eléctrico, o capacitor como se muestra en la Figura 1, es un componente pasivo, al igual que los resistores, pero con la particularidad de poder almacenar energía en forma de campo eléctrico. Este campo es generado por la separación de cargas eléctricas entre dos superficies conductoras, que comúnmente son láminas o placas, las cuales están separadas por un material dieléctrico o por vacío. Cuando las placas se someten a una diferencia de potencial, adquieren cargas eléctricas opuestas (una placa positiva y la otra negativa), manteniéndose constante la carga total del sistema. El condensador es un dispositivo de dos terminales y puede tener polaridad en sus conexiones [11].

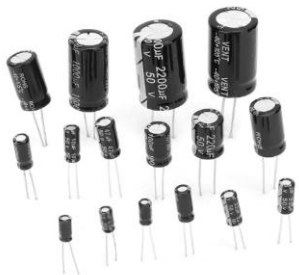


Figura 1. Capacitor.

2.2 Circuito Integrado LM358N

El Circuito Integrado LM358N como se muestra en la Figura 2, cuenta con dos amplificadores operacionales de alta ganancia y frecuencia, diseñados específicamente para operar con una única fuente de alimentación en un amplio rango de tensiones. También es posible su funcionamiento con fuentes de alimentación divididas. Además, su consumo de corriente es bajo y permanece independiente de la magnitud de la tensión de alimentación [12].

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 13, pp. 168 - 177.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

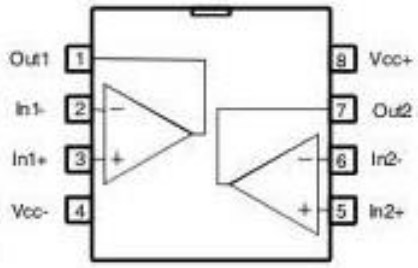


Figura 2. Circuito Integrado LM358N.

2.3 Resistencia

Las resistencias como se muestra en la Figura 3, son componentes electrónicos que resisten el flujo de electricidad en un circuito. Los resistores se usan en circuitos eléctricos para ajustar la corriente y el voltaje, de la misma manera que se usan los grifos para ajustar el flujo de agua del grifo. Se pueden usar no solo para controlar el flujo de corriente, sino también para distribuir voltaje en un circuito [13].

Figura 3. Resistencia.

2.4 PIC16F877

El PIC16F877 como se muestra en la Figura 4, es un microcontrolador con memoria de programa tipo FLASH, lo que representa gran facilidad en el desarrollo de prototipos y en su aprendizaje ya que no se requiere borrarlo con luz ultravioleta como las versiones EPROM (erasable programmable ROM), sino que permite reprogramarlo nuevamente sin ser borrado con anterioridad [14].

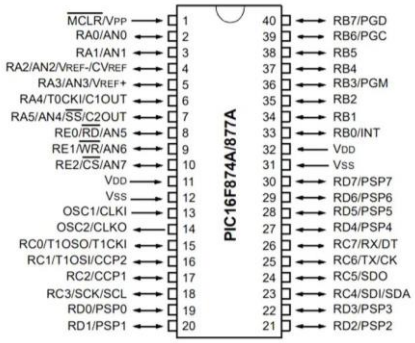


Figura 4. Resistencia.

2.5 Sensor de Pulso Cardíaco Fotoeléctrico

El sensor como se muestra en la Figura 5, funciona con un sensor de ritmo cardíaco óptico, una etapa de amplificación y un filtro para el ruido, lo cual hace que su señal de salida sea confiable y estable. El consumo de corriente es bajo siendo de 4 mA con una alimentación de 5 V [15].

Figura 5. Sensor de Pulso Cardíaco Fotoeléctrico.

2.6 *Módulo bluetooth para Arduino y microcontrolador*

El módulo Bluetooth como se muestra en la Figura 6, que permite conectar los proyectos con Arduino a un smartphone, celular o PC de forma inalámbrica (Bluetooth), con la facilidad de operación de un puerto serial. La transmisión se realiza totalmente en forma transparente al programador, por lo que se conecta en forma directa a los pines seriales del microcontrolador preferido (respetando los niveles de voltaje, ya que el módulo se alimenta con 3.3V). Todos los parámetros del módulo se pueden configurar mediante comandos AT. La placa también incluye un regulador de 3.3V, que permite alimentar el módulo con un voltaje entre 3.6V - 6V [16].

Figura 6. Módulo bluetooth para Arduino y microcontrolador.

2.7 *Módulo de Medición de la frecuencia cardiaca con Arduino*

El módulo a electrónica es una de las áreas tecnológicas más versátiles y adaptables, encuentra su aplicación en múltiples áreas de la ciencia y tecnología. Una de ellas es en el campo de la medicina, en donde juega un papel muy importante e incluso se ha reservado un área para este fin. La electromedicina es el área de la salud dedicada a la investigación de nuevas tecnologías y dispositivos electrónicos con aplicación en la clínica médica. Algunos desarrollos relacionados son: el electrocardiograma, entre otros. De forma práctica se muestra cómo puede fabricar un propio medidor de frecuencia cardiaca con tu tarjeta de desarrollo Arduino y un sensor infrarrojo de bajo costo como se muestra en la Figura 7 [17].

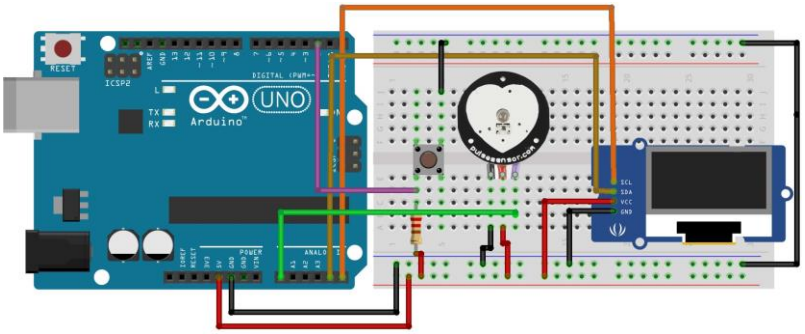


Figura 7. Módulo de Medición de la frecuencia cardiaca con Arduino

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 13, pp. 168 - 177.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

3. Metodología

El proyecto se divide en cinco etapas: la primera etapa corresponde al sensor, la segunda a la amplificación y acondicionamiento de la señal, la tercera a la visualización, la cuarta a la realización de pruebas, y finalmente, la quinta etapa se enfoca en la construcción del sistema.

3.1 Etapa del sensor

En esta etapa, se utiliza el sensor de partículas Resd Print Tech Sensor Pulso Cardíaco Ritmo, un sensor flexible y potente que permite detectar la distancia, la frecuencia cardíaca, la presencia de partículas e incluso el parpadeo ocular. Este sensor está equipado con tres LED y un detector de fotones de alta sensibilidad. El principio de funcionamiento se basa en la emisión de luz desde los distintos LED y la detección de la luz reflejada por las partículas presentes. Dependiendo de la firma reflejada, es posible identificar diferentes materiales, como sangre oxigenada o humo.

El sensor utiliza un LED rojo, un LED verde y un LED infrarrojo (IR), lo que permite detectar la presencia, latidos cardíacos y monitorear la frecuencia cardíaca, incluyendo su uso en oximetría de pulso. Está diseñado para operar a 5V y es compatible con microcontroladores que funcionen tanto a 3.3V como a 5V. Además, se emplea una placa Arduino que se encarga de la comunicación I2C (circuito inter-integrado), manejo de bits, y la escritura y lectura de datos de las muestras.

3.2 Etapa de amplificación

En esta etapa se emplea el amplificador LM35 en una configuración de amplificador no inversor como se muestra en la Figura 8. Este circuito integrado es altamente versátil y económico, y lo más relevante es que se adapta perfectamente a las necesidades del diseño, proporcionando una amplificación eficiente y adecuada para la señal procesada.

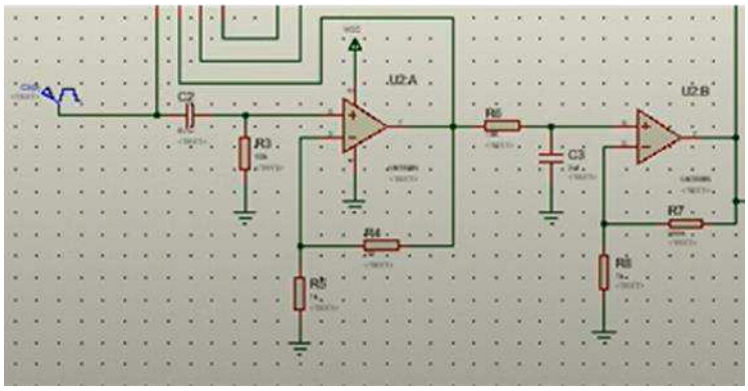


Figura 8. LM35 en configuración de amplificador no inversor.
Fuente propia.

3.3 Etapa de visualización

En esta etapa, los datos procesados se enviarán a una aplicación en Android como se puede ver en la Figura 9, la cual es controlada por un microcontrolador. La aplicación monitorea los valores de la frecuencia cardíaca y, en función de los límites superior e inferior establecidos, emitirá alertas en caso de que la frecuencia cardíaca sea demasiado baja indicará “bradicardia” o demasiado alta indicará “taquicardia”, permitiendo una respuesta rápida ante cualquier irregularidad.

a) Bradicardia b) Taquicardia

Figura 9. Visualización de alerta.
Fuente propia.

3.4 Etapa de pruebas

A continuación, se presenta el funcionamiento del programa adaptado para monitorear la señal desde su origen hasta su ingreso al microcontrolador. La señal original, representada en color amarillo, tiene una amplitud aproximada de un milivoltio y una frecuencia de 1 Hz. Este tipo de señal es similar a la que se detecta mediante una fotocelda en un caso real.

Inicialmente, la señal de 1 milivoltio se amplifica a 300 milivoltios, como se muestra en la línea azul. Posteriormente, se amplifica nuevamente hasta alcanzar 3.5 voltios, señal representada en color morado, que ingresa de manera estable al dispositivo. Finalmente, la señal procesada que entra al microcontrolador alcanza una amplitud de 5 voltios, lo que facilita su manipulación y procesamiento.

En esta simulación, la señal de 1 Hz corresponde a 60 pulsaciones por minuto, lo cual refleja un estado normal del ritmo cardíaco, como se puede ver en la Figura 10.

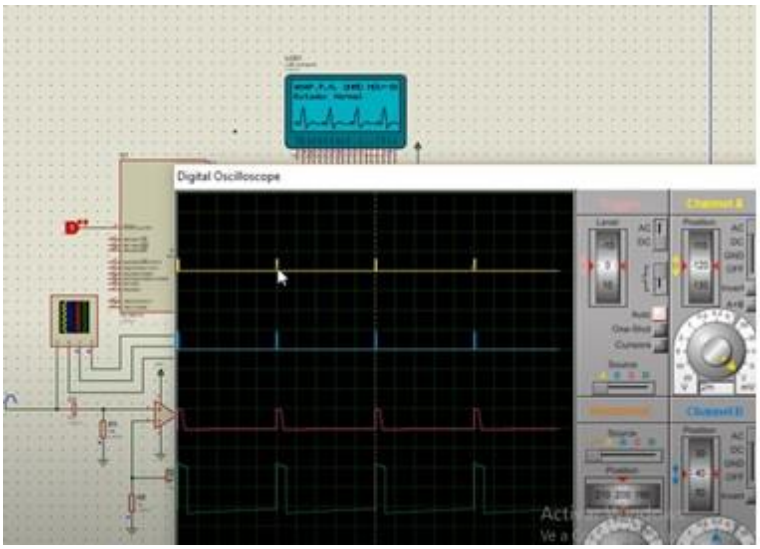


Figura 10. Estado normal de 60 pulsaciones/minuto.
Captura del circuito.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 13, pp. 168 - 177.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Se introduce una señal de 0.5 Hz, y según la programación establecida, esto debería indicar un estado de bradicardia en el paciente, como se observa en la Figura 11.

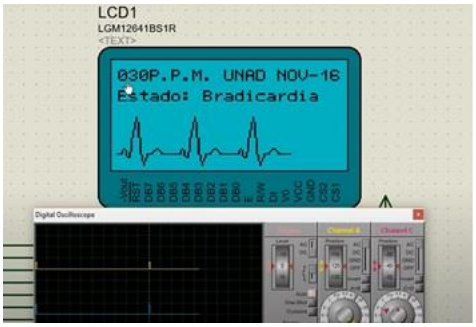


Figura 11. Estado de bradicardia.
Captura del circuito.

Se introduce una señal de 1.8 Hz, y al ejecutar el esquema, se observa que la visualización corresponde a la programación realizada. La señal de entrada, equivalente a 102 pulsaciones por minuto, indica un estado de taquicardia como se muestra en la Figura 12, lo que activa la alarma correspondiente en el programa del celular.

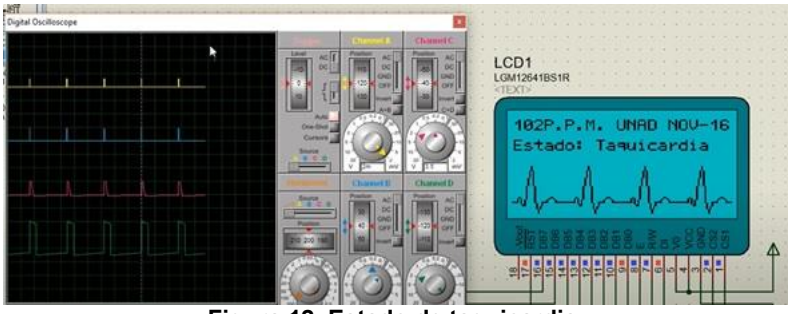


Figura 12. Estado de taquicardia.
Captura del circuito.

La aplicación, diseñada para dispositivos móviles, tiene la función de enviar una alerta al usuario de la pulsera, informando sobre el estado de su ritmo cardíaco. La pulsera transmite la señal a través de Bluetooth, lo que activa una notificación en la aplicación, como se muestra en la Figura 13.

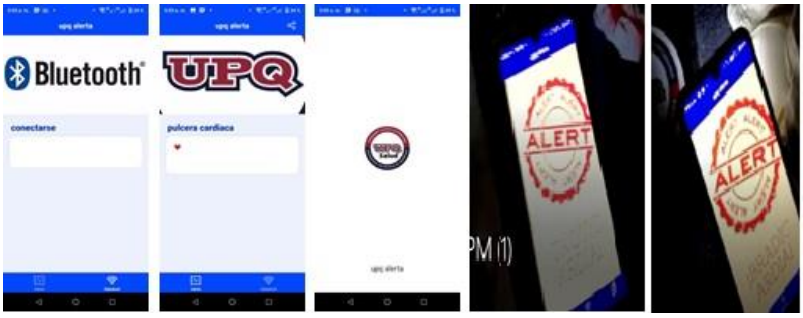


Figura 13. Aplicación en dispositivo.
Fuente propia.

3.5 Construcción del sistema

Se procedió con la fabricación del circuito de amplificación destinado a la adquisición de señales, tal como se muestra en la Figura 14.

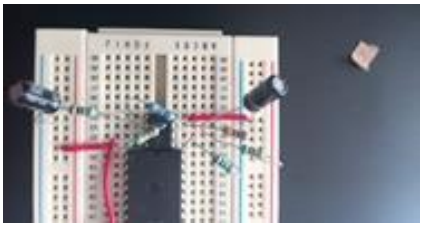


Figura 14. Circuito de amplificación.
Fuente propia.

Se llevó a cabo la conexión del circuito integrado y la configuración del módulo Bluetooth, como se muestra en la Figura 15.

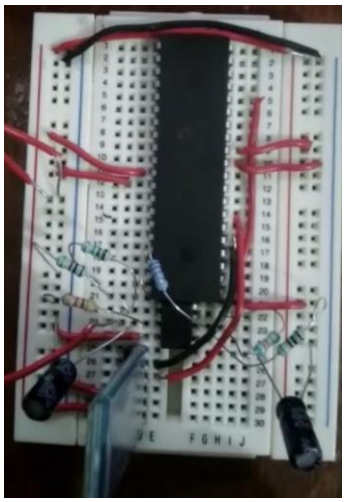


Figura 15. Circuito de PIC y bluetooth.
Fuente propia.

Se programó el PIC (Programmable Integrated Circuit) para la adquisición de señales y el envío de estas al dispositivo móvil, con el fin de monitorear a los conductores, como se muestra en la Figura 16.

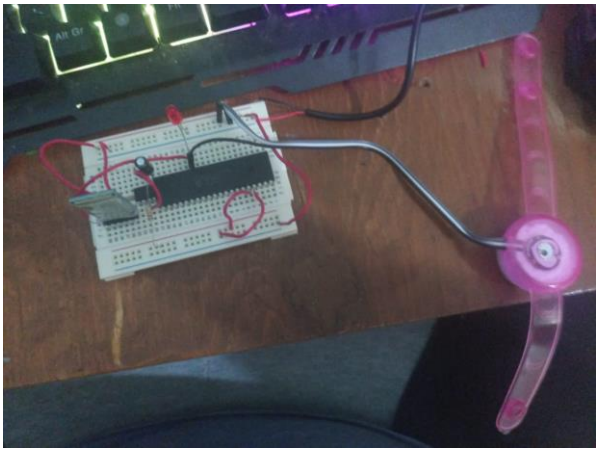


Figura 16. Programación de PIC y adquisición de señales
Fuente propia.

4. Resultados

El sistema desarrollado se evaluó en cada una de sus cinco etapas, obteniendo resultados satisfactorios. El sensor de partículas Resd Print Tech Sensor Pulso Cardíaco Ritmo se demostró su efectividad en la detección de señales cardíacas y partículas, mostrando una buena respuesta en la diferenciación de materiales como sangre oxigenada y humo. El amplificador LM35 amplificó con éxito la señal inicial de 1 milivoltio a 300 milivoltios y luego a 3.5 voltios, asegurando una señal estable para su procesamiento. La aplicación Android funcionó correctamente, monitoreando en tiempo real los valores de la frecuencia cardíaca y emitiendo alertas ante situaciones críticas. Una señal de 0.5 Hz fue identificada como bradicardia y una de 1.8 Hz como taquicardia, activándose las respectivas alarmas. Las pruebas confirmaron que el sistema reconoce eficazmente tanto frecuencias cardíacas normales (1 Hz, 60 pulsaciones por minuto) como anómalas, lo que asegura su fiabilidad para el monitoreo y alerta en tiempo real de los conductores.

5. Conclusiones

El desarrollo de este sistema de monitoreo de señales cardíacas para conductores ha demostrado ser una herramienta eficaz para la detección en tiempo real de anomalías en la frecuencia cardíaca, como bradicardia y taquicardia. A lo largo de las cinco etapas del proyecto, se validó el funcionamiento óptimo de cada componente, desde la captura de la señal hasta la visualización y alerta en un dispositivo móvil.

El sensor Resd Print Tech Pulso Cardíaco Ritmo demostró ser preciso y eficiente en la detección de señales, mientras que el amplificador LM35 permitió procesar y amplificar la señal de manera adecuada para su envío al microcontrolador. La integración de estos elementos con la aplicación Android fue clave para permitir un monitoreo en tiempo real y la emisión de alertas ante condiciones cardíacas críticas.

Las pruebas realizadas confirmaron que el sistema es capaz de detectar frecuencias cardíacas normales y anómalas, garantizando la emisión de alertas en tiempo real al usuario. Este sistema no solo mejora la seguridad de los conductores, sino que también abre posibilidades para su uso en otras aplicaciones de salud y monitoreo remoto, aportando un valor significativo a la prevención de accidentes relacionados con la fatiga o estrés.

En resumen, el sistema diseñado es confiable, eficiente y adecuado para su implementación en entornos donde la vigilancia continua del estado de salud del conductor es fundamental, contribuyendo a mejorar la seguridad vial y rápida respuesta ante situaciones de emergencia.

Entre las posibles mejoras para el prototipo, se destaca la incorporación de sensores con mayor precisión para optimizar la medición del ritmo cardíaco. Además, se propone desarrollar una interfaz de usuario más intuitiva y accesible, que permita una calibración del sistema de manera sencilla y eficiente, mejorando así la experiencia del usuario.

Referencias

[1] Yusuf, S., Hawken, S., Ôunpuu, S., et al. “*Effect of potentially modifiable risk factors associated with myocardial infarction in 52 countries (the INTERHEART study): Case-control study*”, The Lancet, Elsevier, Vol. 364, No. 9438, pp. 937-952, 2004.

[2] Pantelopoulos, A., & Bourbakis, N. G. “*A survey on wearable sensor-based systems for health monitoring and prognosis*”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), IEEE, Vol. 40, No. 1, pp. 1-12, 2010.

[3] Habetha, J. “*The MyHeart project—Fighting cardiovascular diseases by prevention and early diagnosis*”, Proceedings of the International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, IEEE, pp. 6746-6749, New York, 2006.

[4] Shnayder, V., Chen, B. R., Lorincz, K., et al. "*Sensor networks for medical care*", Technical Report TR-08-05, Division of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, pp. 1-12, Cambridge, 2005.
[5] Fensli, R., Gunnarson, E., & Gundersen, T. "*A wearable ECG-recording system for continuous arrhythmia monitoring in a wireless tele-home-care situation*", Proceedings of the International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, IEEE, pp. 3757-3760, Shanghai, 2005.
[6] Livenpace. "*0004 portable ECG monitor manual*". Manuals.plus. Fecha de recuperación 26 de septiembre 2024. Disponible en https://manuals.plus/es/livenpace/0004-portable-ecg-monitor-manual
[7] *Getwellue. "*Monitor de frecuencia cardíaca VisualBeat"*. Getwellue. Fecha de recuperación 26 de septiembre 2024.* Disponible en https://es.getwellue.com/productos/monitor-de-frecuencia-card%C3%ADaca-visualbeat
[8] Azul Web. "*Así es como funciona la medición de ritmo cardíaco en smartwatch deportivos"*. AzulWeb. Fecha de recuperación 26 de septiembre 2024. Disponible en https://www.azulweb.net/asi-es-como-funciona-la-medicion-de-ritmo-cardiaco-en-smartwatch-deportivos/
[9] Roth, G. A., Johnson, C., Abajobir, A., et al. "*Global, regional, and national burden of cardiovascular diseases for 10 causes, 1990 to 2015*", Journal of the American College of Cardiology, Elsevier, Vol. 70, No. 1, pp. 1-25, 2017.
[10] World Health Organization. "*Cardiovascular diseases (CVDs)*", WHO Fact Sheets, World Health Organization, 2021.
[11] Mecatrónica LATAM. "*Capacitor*", Mecatrónica LATAM. Fecha de recuperación 08 de septiembre 2024. Disponible en: https://www.mecatronicalatam.com/es/tutoriales/electronica/componentes-electronicos/capacitor/.
[12] Carrod Electrónica. "LM358N", Carrod Electrónica. Fecha de recuperación 08 de septiembre 2024. Disponible en: https://www.carrod.mx/search?type=product&q=LM358N
[13] Hioki. "Resistencia", Hioki. Fecha de recuperación 08 de septiembre 2024. Disponible en: https://www.hioki.com/us-es/learning/electricity/resistance.html
[14] ElectroCrea. "PIC16F877A-I/P Microcontrolador", ElectroCrea. Fecha de recuperación 08 de septiembre 2024. Disponible en: https://electrocrea.com/products/pic16f877a-i-p?_pos=1&_sid=86ebac08a&_ss=r
[15] Tresdprinttech. "*Sensor de Pulso Cardíaco Fotoeléctrico*", Tresdprinttech. Fecha de recuperación 08 de septiembre 2024. Disponible en: https://tresdprinttech.com/producto/sensor-de-pulso-cardiaco/
[16] Naylamp Mechatronics. "*Módulo Bluetooth HC05*" Naylamp Mechatronics. Fecha de recuperación 08 de septiembre 2024. Disponible en: https://naylampmechatronics.com/inalambrico/43-modulo-bluetooth-hc05.html
[17] Agencia Espacial Mexicana. "*La exploración espacial y sus beneficios en la salud humana. Hacia el Espacio*". Fecha de recuperación 08 de septiembre 2024. Disponible en: https://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=797

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 14, pp. 178 - 194.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Diseño de una Máquina Clasificadora de Tomate

Oscar Delgadillo González, Javier Bracamontes Bonilla, Jorge Talavera Otero, Omar Désiga Orenday, Flabio Darío Mirelez Delgado y Umanel Azazael Hernández González.

Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas (UPIIZ-IPN)
Ingeniería Mecatrónica
Zacatecas, Zac., México
fmirelezd@ipn.mx

Resumen

En el desarrollo del presente trabajo, se realizó el diseño funcional automatizado para clasificar tomate en dos niveles de madurez establecidos (maduro y no maduro) mediante un sistema óptico. El sistema diseñado será capaz de clasificar el producto en tres variantes de tamaño por medio de un sistema mecánico de tamizado; con la propuesta de diseño se busca incorporar un sistema automatizado para redirigir el fruto según su nivel de madurez y por medio de una interfaz humano – máquina mostrar al usuario el conteo de la producción del fruto con base en el grado de madurez. El sistema está pensado para ser utilizado por pequeños productores de tomate en el estado de Zacatecas, con el objetivo de lograr una clasificación adecuada del fruto y mejorar las condiciones para su comercialización. A lo largo del documento, se abordarán temas relevantes, como los antecedentes de proyectos similares, marco teórico que delimita el proyecto, la viabilidad de éste, al igual que la metodología para llevar a cabo el prototipo.

Palabras clave: Automatización, interfaz humano - máquina, producción, sistema óptico, tamizado, tomate.

1. Introducción

El tomate es una de las frutas y hortalizas más consumidas en todo el mundo. Se consume como fruta o verdura fresca o como producto procesado. En un futuro próximo, cada hectárea de tierra disponible deberá alcanzar una intensidad de cultivo de al menos el 200% con cultivos selectivos y características de alto rendimiento[1,2].

Existen muchos métodos de procesamiento del tomate que implican ingeniería y medio. Las unidades industriales grandes y pequeñas se dedican al procesamiento del tomate en diversas formas utilizando un gradiente de temperatura de 70 °C para aislar la cáscara y las semillas de la pulpa, destruyendo las semillas por completo y sacrificando así la calidad de la pulpa [3–5].

En la actualidad, los pequeños empresarios incursionan en el cultivo de tomate con invernaderos, lo cual conlleva la pérdida de productos y la pérdida de beneficios por errores de clasificación o la falta de ellas. La principal razón radica en que las clasificadoras automatizadas comercializadas, en su mayoría son de grado industrial y de un costo muy elevado para un productor de larga escala. Asimismo, este tipo de maquinaria requiere aproximadamente 24 personas repartidas en diversas secciones [3,6].

El proyecto se basa en los desafíos que enfrenta la agricultura, en particular la producción del tomate, debido a problemas en la clasificación de los productos cosechados. Esto genera un impacto negativo tanto a la calidad y el valor de los productos como a los costos de mano de obra de los agricultores [7,8].

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 14, pp. 178 - 194.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

La falta de acceso a máquinas clasificadoras industriales asequibles representa un obstáculo significativo para los agricultores, especialmente para los pequeños empresarios. Las estadísticas muestran que esta problemática es relevante, ya que según datos del INEGI México se encuentra dentro de los principales productores de tomate ocupando el décimo lugar mundial con una producción que supera los 3 millones de toneladas al año. Se estima que hasta un 20% de la producción se pierde debido a problemas de clasificación y manejo inadecuados, según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) [8,9].

Este proyecto tiene como objetivo diseñar, una máquina clasificadora de tomate que logre ser asequible y que además utilice sistemas de visión artificial y conocimientos aplicados en mecatrónica. Con esto se busca abordar un problema real en la agricultura, ofreciendo soluciones económicas y tecnológicas. Además, se espera que los resultados tengan un impacto positivo en la economía agrícola y mejoren la calidad de productos que pueden ofrecer los agricultores y con esto mejorar su calidad económica.

2. Metodología

Se diseño un prototipo de una clasificadora de tomate con el fin de la disminución de esfuerzo para los obreros y el aumento de producción de tomate. La cual contará con un sistema óptico para permitir la distinción del grado de madurez de tomate, entre las opciones de maduro y no maduro, esto por medio de la tonalidad del fruto tomando como maduro el color rojo y no maduro las tonalidades verdes. Al sistema se acoplará el diseño de un mecanismo/sistema capaz de automatizar la redirección del tomate con base en su madurez teniendo dos vialidades para el fruto (figura 1).

Por otro lado, contará con un mecanismo encargado de clasificar el tamaño del tomate en los grados de madurez aceptados, esto por medio de una serie de tamizadoras con distintos diámetros de perforación. Dicho sistema no debe modificar las características físicas del tomate, como lo son la firmeza y forma.

El prototipo funcional contará con una HMI (interfaz humano-máquina), que permitirá conocer un conteo de producción a tiempo real con base en el número de tomates clasificados según la madurez, al igual de notificar al usuario por medio de una alerta visual cuando los recipientes encargados de recolectar el tomate clasificado estén cerca de su máxima capacidad.

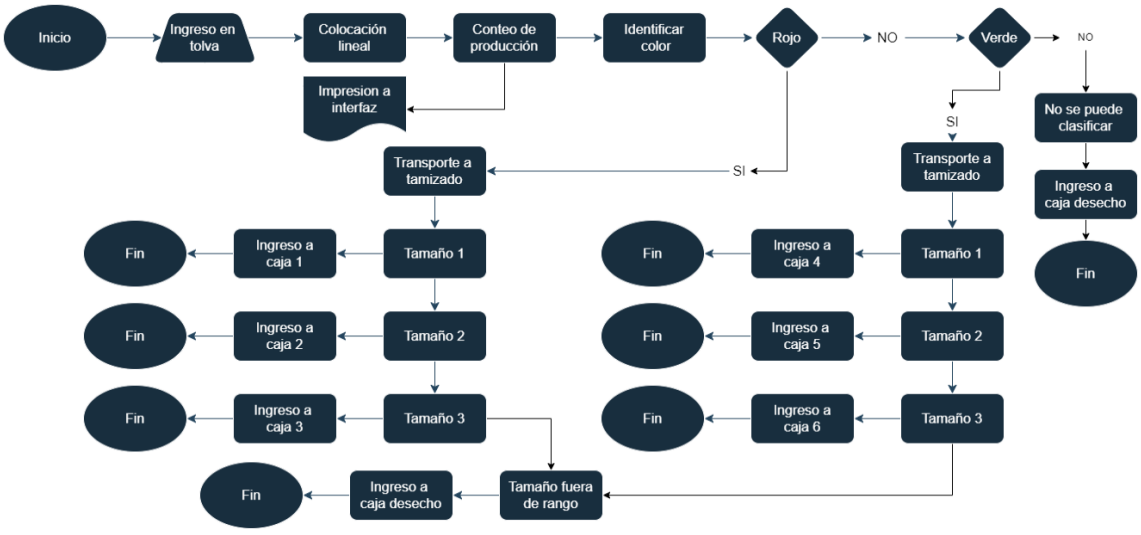


Figura 1. Diagrama del proyecto propuesto|.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 14, pp. 178 - 194.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

2.1 Diseño Conceptual

Cada vez más, pequeños empresarios incursionan al cultivo de tomate con invernaderos, y esto conlleva la pérdida de producto y ganancia por errores de clasificación o por falta de esta. El principal motivo es que las clasificadoras automatizadas comercializadas, en su mayoría son de grado industrial y de un costo muy elevado para un productor de no muy alta escala. A su vez, este tipo de maquinaria necesita aproximadamente 24 personas distribuidas en las distintas secciones [1].

Teniendo en cuenta las funciones del sistema en base en las necesidades del usuario se realizaron un diagrama IDEF-0 para poder definir el proceso que realiza el dispensador automático de medicamentos como se muestra en la Figura 2.

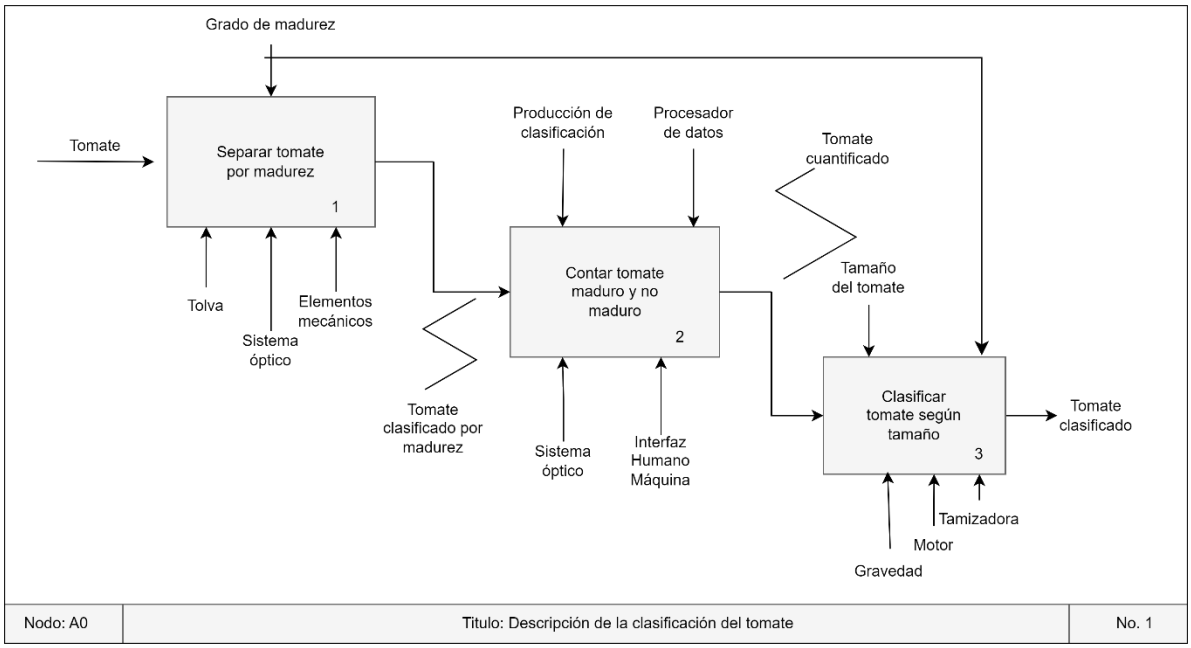


Figura 1. IDEF A0.

El sistema tendrá un tamaño aproximado de 285cm x 141 cm x 80 cm donde se busca tener una capacidad que soporte al menos 1 reja a la vez a la entrada, al mismo tiempo una velocidad se pase un tomate en aproximadamente cada 2 segundo para asi tener una producción de 1/4 de tonelada por hora. Las medidas del tomate para los rodillos tamizadores son: chico-->3-4cm, mediano-->4.1-7cm, grande-->7.1-9cm. Para la alimentación se busca un voltaje a la entrada de la maquina es a instalación 120v con tierra física y los voltajes internos son de 24 y 5v.

En la tabla de necesidades (Tabla 1) se enumeran las necesidades al igual que su importancia, siendo clasificadas con el número 5 la importancia mayor, con el número 4 la importancia media mayor, con el número 3 la importancia media y con el número 2 la importancia menor. Dentro de la tabla se incluyen necesidades respecto al estado físico del fruto, el sistema de iluminación a incorporar, la calidad de captura de la cámara, mantener una interfaz humano – máquina amigable facilitando su uso, un bajo costo referente a máquinas de la misma índole, la cantidad de tomates a separar, la eficiencia de la máquina, las dimensiones deben ser asequibles a una fácil transportación y mantener elementos físicos para asegurar la integridad del usuario.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 14, pp. 178 - 194.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Tabla 1. Necesidades del sistema.

No.		Necesidad	Importancia
1	El sistema	No debe afectar el estado físico del fruto	4
2	El sistema	Debe tener una buena iluminación para el sistema óptico	5
3	El sistema	Debe tener una buena calidad de captura	3
4	El sistema	Debe tener una interfaz amigable para usuarios poco relacionados con maquinaria de este tipo	2
5	El sistema	Debe poder diferenciar mínimo 2 estados de madurez del tomate	5
6	El sistema	Debe tener bajo costo en relación con la maquinaria similar ya existente	3
7	El sistema	Debe separar el tomate en 3 tamaños	5
8	El sistema	Debe tener una eficiencia de ¼ de tonelada por hora	4
9	El tomate	Debe haber pasado un proceso de lavado antes de ingresar a la máquina	5
10	El sistema	Debe tener una estructura de un tamaño asequible para su transporte	3
11	El sistema	Debe tener elementos físicos que aseguren una reducción de riesgos para el operador	4

Se realizo un diseño conceptual donde la entrada al sistema es una rampa vibratoria. Con el fin de linealizar el tomate se tiene un rodillo accionado con un motor y con perforaciones superficiales para movilizar el fruto. Seguido a esto se encuentra el sistema de óptico basado en visión artificial. Dentro de los rieles se encuentran retenedores pasivos para controlar el flujo y como clasificador de madurez, es incorporado un cabezal giratorio con rieles. Para la clasificación mecánica cuenta con dos bandejas que incorporan 3 rodillos perforados según las distintas dimensiones de los tomates, estos son accionados por un motor y bandas, y redirigen el tomate hacía las rejas de recolección. La interfaz humano-máquina es mediante una pantalla y el controlador principal es un PLC. Los materiales de construcción son acero dulce, lámina galvanizada y acero inoxidable. En la figura 3 se muestra el diseño conceptual.

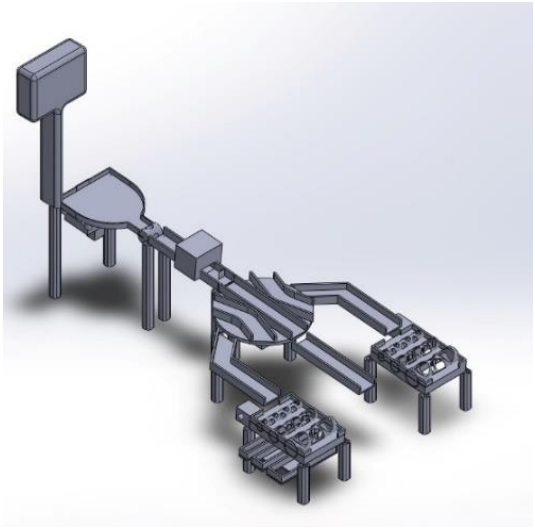


Figura 3. Diseño Conceptual.

2.2 Diseño Mecánico

En el diseño mecánico, se inició por trabajar en los rodillos de tamizado. Para estos, se propuso un diseño en acero galvanizado como material principal. Los rodillos contarán con un diámetro externo de 15 cm (figura 4), el tamaño adecuado para la fácil circulación de los tomates grandes. Cuentan con una serie de perforaciones a lo largo del rodillo, con el fin de poder tamizar el tomate en distintos tamaños.

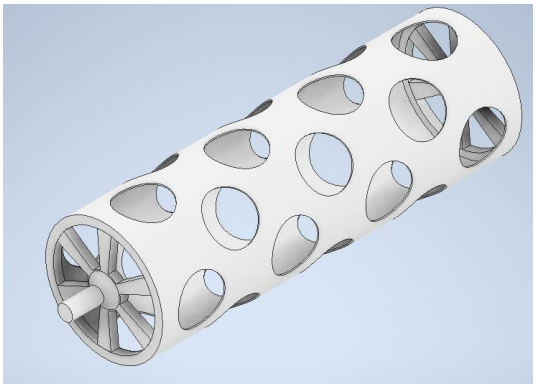


Figura 4. Diseño del rodillo de tamizado

Para el sistema de selección se opta por realizar un mecanismo de tipo compuerta (figura 5), encargado de redirigir el tomate entre dos carriles, esto basándose en su madurez. Siendo impulsado por un actuador lineal.

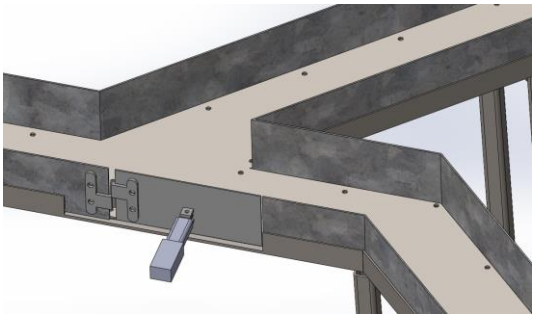


Figura 5. Sistema de compuerta clasificadora

Se calcula la velocidad de desplazamiento, considerando que el carril es de 10 cm y el sistema debe de responder en menos de 2 s, se tiene:

$$v = \frac{d}{t} \tag{1}$$

$$v = 0.05 \frac{m}{s}$$

Teniendo la velocidad de desplazamiento (1), se busca la aceleración en la compuerta, con el fin de obtener la fuerza necesaria para su movimiento.

$$a = \frac{v}{t} \tag{2}$$

$$a = 0.025 \frac{m}{s^2}$$

Se calcula la fuerza necesaria para el desplazamiento:

$$F = m * a \tag{3}$$

Donde
m.- Masa del objeto.
a.- aceleración del objeto

$$F = 0.000325\ N$$

Para calcular la potencia teórica, se analiza el comportamiento de las fuerzas (figura 6) al momento de abrir una puerta.

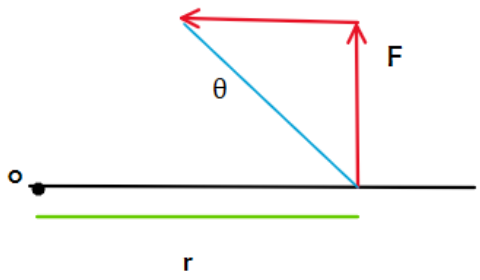


Figura 6. Diagrama de fuerzas en una puerta

Donde:
F. - Fuerza aplicada.
r. - Distancia del pivote al punto de contacto
θ. - Ángulo de aplicación de fuerzas.

Se puede definir como:

$$T = rFsen(\theta) \tag{4}$$

$$T = 0.0886\ Nm$$

Se encuentra como requerimiento una velocidad de 0.05 m/s, una fuerza de 0.000325 N y una potencia de 0.0886 Nm.

Con el fin de evitar que el fruto sufra de atascamiento al ingresar al sistema, ya que existe una reducción considerable de flujo. Se implementará un sistema vibratorio, encargado de organizar el tomate. Para dicha acción se designa un mecanismo biela-manivela (figura 7), con un recorrido máximo de 5 cm.

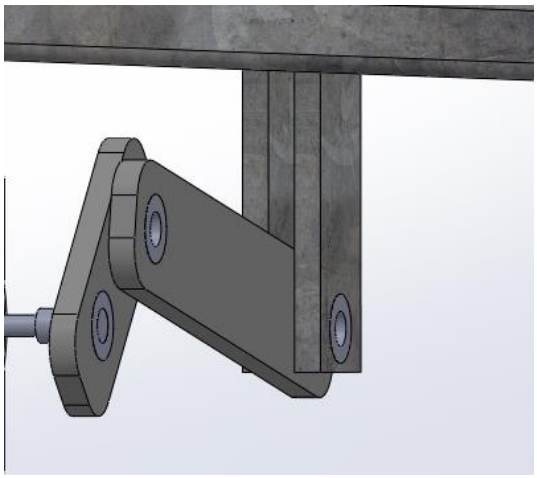


Figura 7. Mecanismo Biela-manivela

Para la selección mediante potencia y velocidad del motor encargado de alimentar el mecanismo, se encuentra como requerimiento una potencia de 1.82 Nm y una velocidad de 300 rpm.

Para mantener un flujo constante y controlado al carril principal, se opta por un rodillo limitador (figura 8), encargado de permitir el paso de un tomate a la vez.

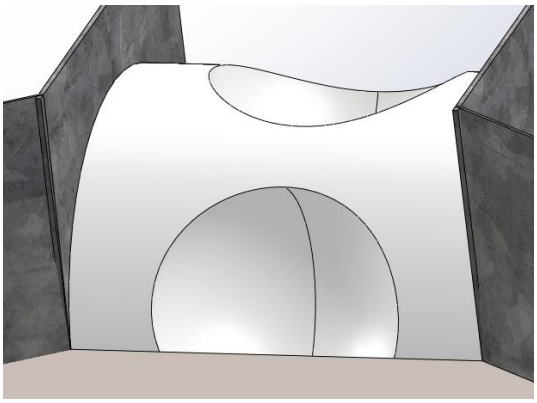


Figura 8. Rodillo limitador

2.3 Diseño Electrónico

Para el sistema eléctrico/electrónico del sistema se emplearon algunos elementos como:

- Controlador. PLC SIEMENS S7-1200 1214C.
- Interfaz. Pantalla GT070E2 de la marca Kinco
- Comunicación PLC-Interfaz. Router
- Sensores. Cámara "maixcam dock ii".
- Actuadores. Motor XD60GA775, Motorreductor RV30, Motorreductor JGY 370
- Controladores. Un controlador H BTS790, controlador H L298.
- Fuente de poder. ATX 750 W.

Para poder tener una selección adecuada entre las variantes de maduro y no maduro (rojo y verde) del tomate se tomó como selección una cámara que contuviera un chip neuronal para procesar con más precisión estas variantes. Además de esto es necesario poder tener algún tipo de conexión entre la cámara y el PLC la cual no podría funcionar por medio del puerto común USB que otorga una webcam.

Como complemento a la cámara, un sistema de visión artificial necesita de una iluminación correcta dependiendo del entorno en el que se va a manejar y así evitar errores en el reconocimiento. Por tanto, para la iluminación antes mencionada se optó por seleccionar un domo de iluminación difusa como el mostrado en la figura 9, de producción propia ya que los encontrados en el mercado representan un gasto significativo para el proyecto.

Figura 9. Diseño del domo

En la Figura 10, se muestra los esquemas completos de conexiones, a excepción de los componentes que serán conectados mediante USB o puerto HDMI.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 14, pp. 178 - 194.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

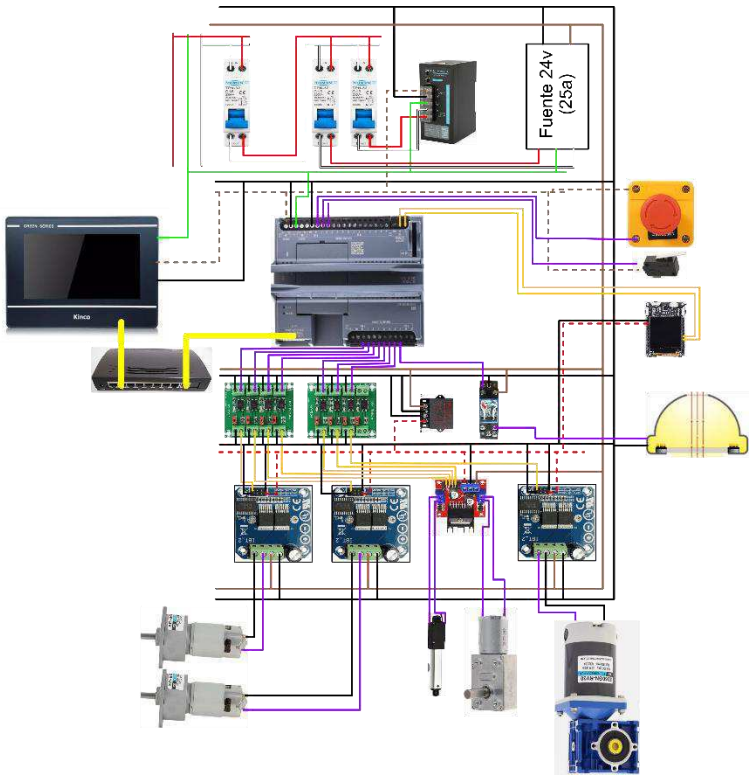


Figura 10. Diseño del domo

2.4 Diseño Electrónico

Con el modelo de pantalla elegido, se realizó un diagrama de flujo. En la figura 11 se encuentra el bloque de funcionamiento principal, puede observarse el inicio, seguido del menú principal, el cual nos permite navegar entre las funciones especificadas.

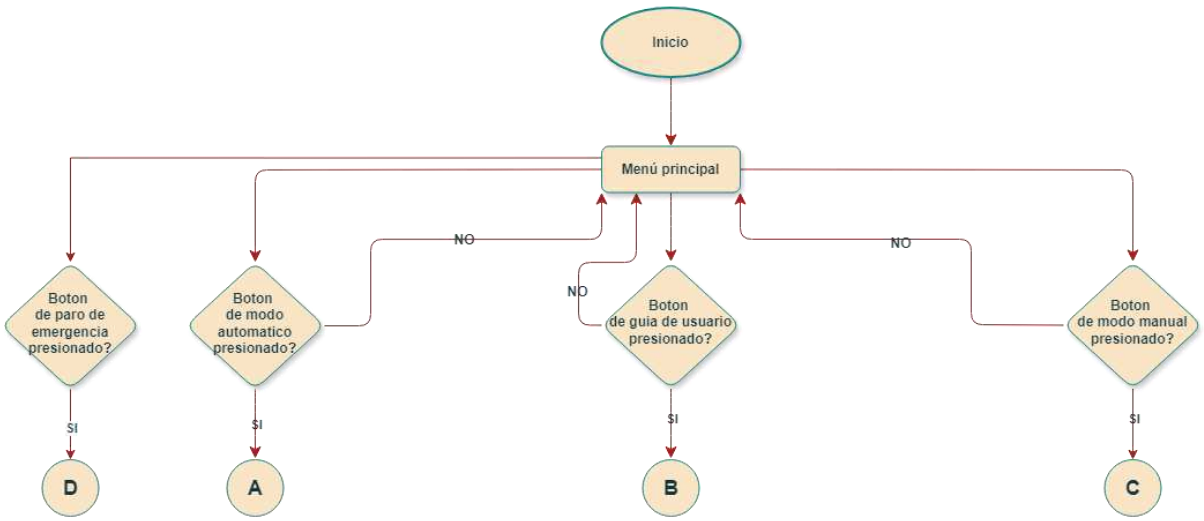


Figura 11. Diagrama principal de funcionamiento del HMI

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 14, pp. 178 - 194.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

En la figura 12, se encuentra la continuación al conector A, se trata del funcionamiento esperado si el botón del modo automático se encuentra presionado, teniendo como opciones indicadores gráficas del conteo, y como interacciones el encender y apagar la máquina, el reseteo de los contadores y dar a conocer el límite del conteo.

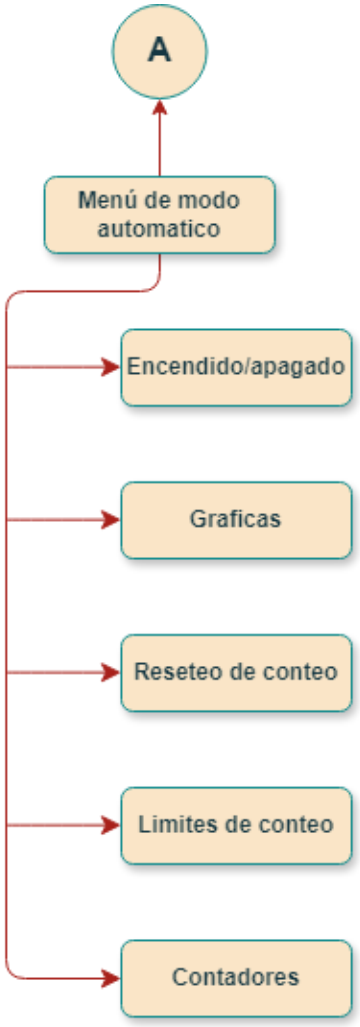


Figura 12. Diagrama A de funcionamiento del HMI.

En la figura 13, se encuentra el funcionamiento si el botón de guía de usuario es presionado, este redirige al usuario a un menú, dando la capacidad al usuario de elegir entre un documento PDF y un código QR, en ambos casos el usuario tendría acceso a la guía de usuario.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 14, pp. 178 - 194.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

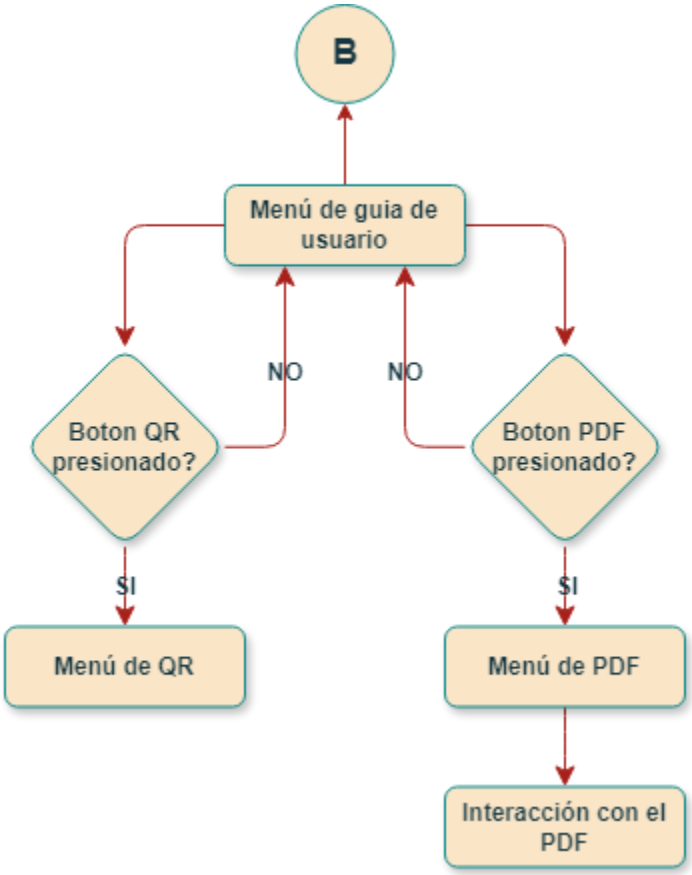


Figura 13. Diagrama B de funcionamiento del HMI.

En la figura 14, se encuentra la continuación del funcionamiento esperado al presionar el botón de modo manual, en donde se tiene acceso a interruptores de cada uno de los actuadores físicos de la máquina, con el fin de probar su funcionamiento.

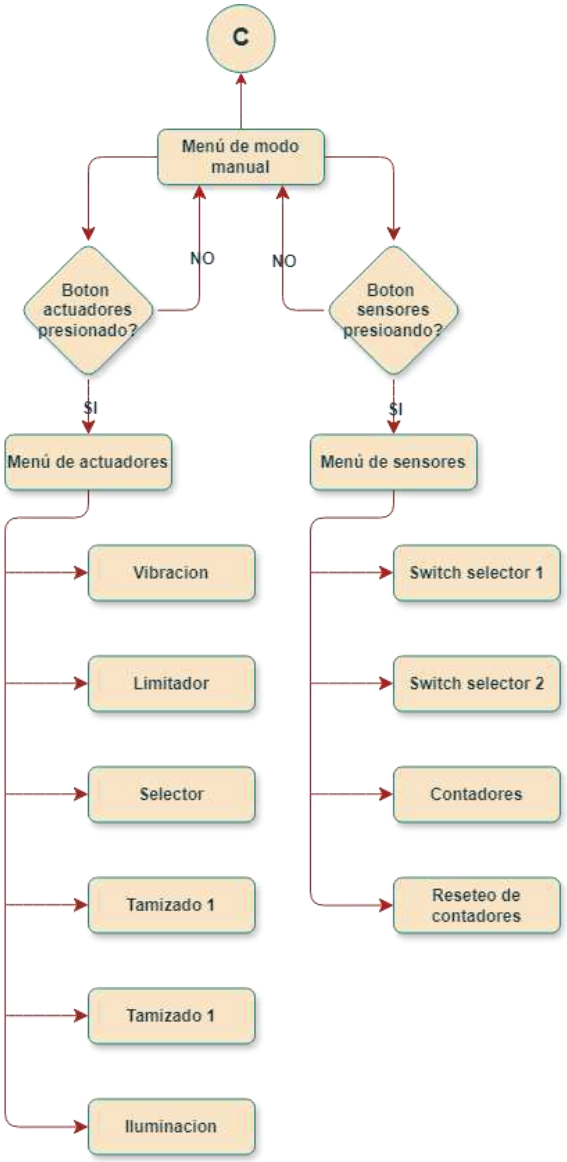


Figura 14. Diagrama C de funcionamiento del HMI.

Por último, en la figura 15, se encuentra la continuación de funcionamiento en caso de que el botón de paro de emergencia sea presionado, contando con indicadores visuales y una rutina de paro de emergencia.

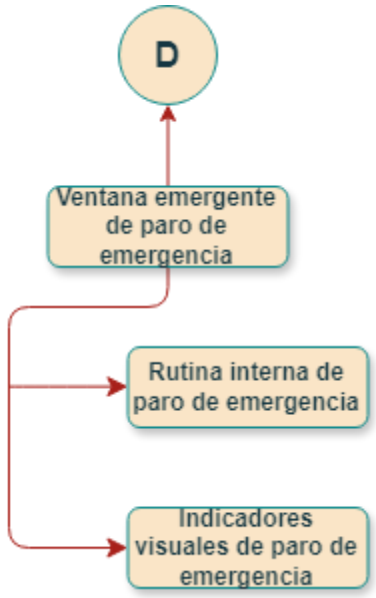


Figura 15. Diagrama D de funcionamiento del HMI.

Con las funciones de operación declaradas en el diagrama de funcionamiento, se realizó el diseño de las pantallas en el HMI. En la pantalla principal (figura 16) se tiene la opción de elegir un funcionamiento automático, un funcionamiento manual, con el fin de realizar pruebas en los actuadores y sensores, además del enlace a una guía de usuario, en la cual se incluirán instrucciones e indicaciones del funcionamiento de la máquina.

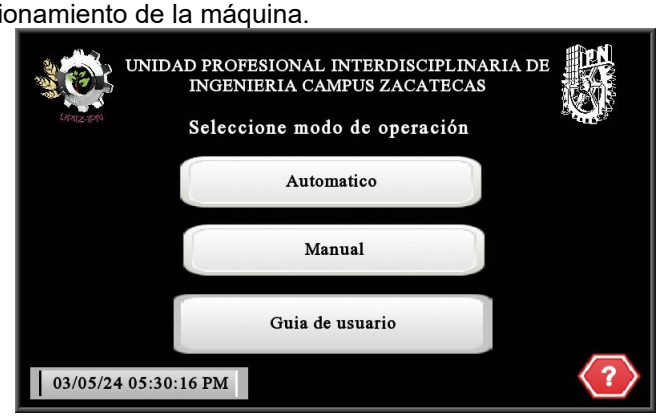


Figura 16. Pantalla principal del HMI.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 14, pp. 178 - 194.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

3. Resultados

Se realizo el diseño detallado del sistema donde se dividió en 3 secciones las cuales se complementan para poder hacer funcionar la máquina en cada una de sus necesidades. Se comienza por la sección de vibración (figura 17), siendo la entrada a la máquina. El mecanismo biela-manivela, en conjunto a un par de reieles de guía lineal HSR20R ayudan a que la placa tenga un movimiento oscilatorio.

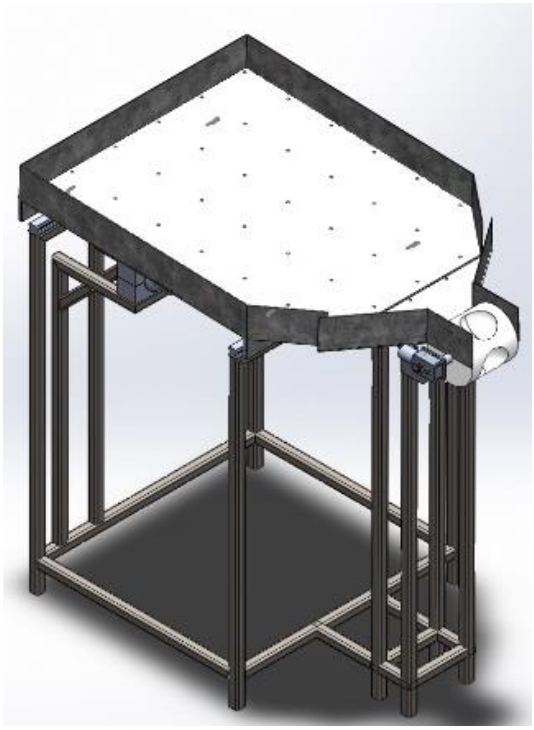


Figura 17. Sistema de vibración.

La segunda sección de la máquina es el sistema de clasificación (figura 18), en esta sección se encuentra el riel principal de la máquina, al igual que el sistema óptico, tablero eléctrico y la base de la interfaz. Cuenta con una compuerta impulsada por un actuador lineal, capaz de redirigir el fruto según la madurez detectada en el sistema de visión artificial encontrado al inicio de la sección.

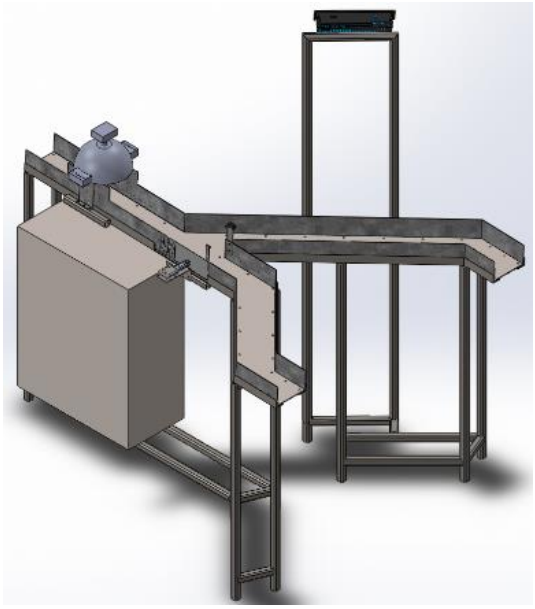


Figura 18. Sistema de clasificado.

La tercera y última sección es el sistema de tamizado (figura 19), este sistema cuenta con una inclinación mayor, al igual que 3 rodillos perforados, alimentados por un motor posicionado en la parte delantera del sistema. En la máquina se incorporan 2 sistemas de tamizado, uno para cada madurez del fruto.

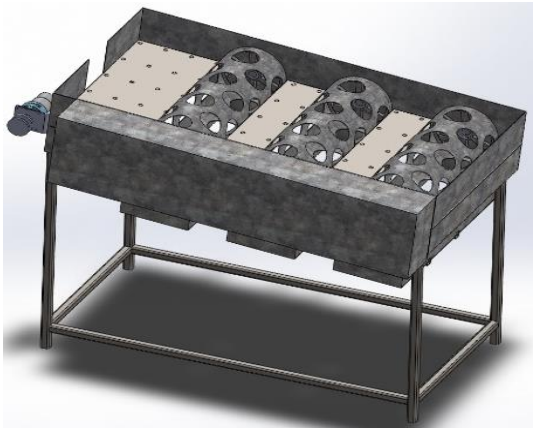


Figura 19. Sistema de tamizado.

Por último, se encuentra la máquina completa (figura 20), esto cuando incorpora los sistemas previamente mencionados.

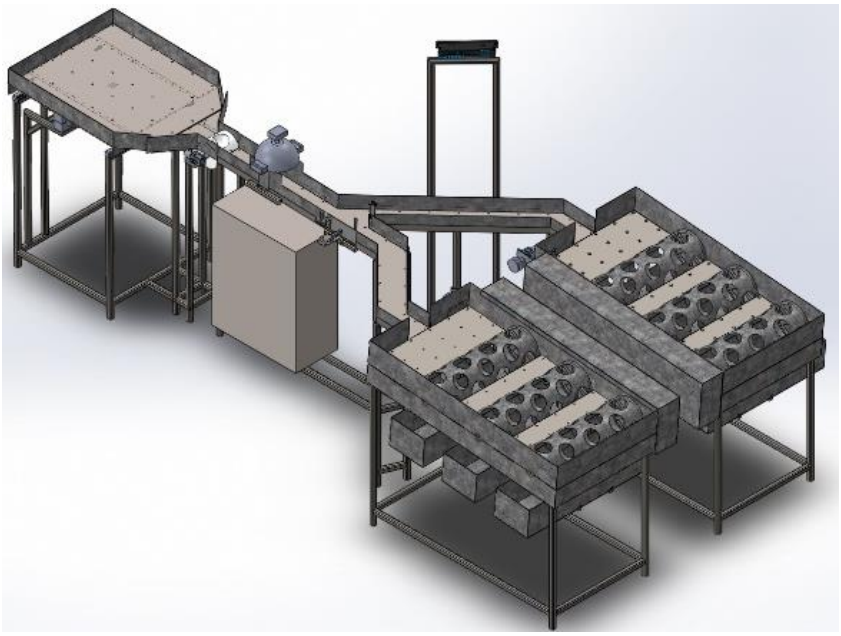


Figura 19. Máquina completa.

4. Conclusiones

Se realizo el diseño detallado de un prototipo funcional de una máquina clasificadora de tomate, equipada con 6 salidas de tomate, siendo, 3 salidas de distinto tamaño con una madurez apta para el comercio y 3 salidas de distinto tamaño con una baja madurez, siendo no apta para el comercio del fruto.

La máquina diseñada cuenta con 3 secciones principales. La entrada, que es un sistema vibratorio, elaborado con el fin de evitar un atascamiento en el flujo del tomate, dicho sistema es alimentado por un mecanismo de biela-manivela, con el fin de dar una alta velocidad, dando un movimiento constante al fruto. En la parte final de este sistema se encuentra un rodillo limitador, la función principal es dar un ritmo constante al flujo del tomate dentro del riel principal, encargado de conectar a la segunda sección de la máquina.

Se realizo el sistema de clasificación óptico, encargado de detectar la madurez del tomate y enviar una señal al actuador lineal, encargado de activar una compuerta que redirige el tomate dependiendo de la señal recibida.

el sistema de tamizado esta conformado por dos estructuras, cada una cuenta con 3 rodillos perforados, alimentados por un motor de corriente directa. Al momento de ingresar el fruto en el sistema, comienza a deslizarse sobre los rodillos y dependiendo del tamaño del fruto es ingresado por cada uno.

Referencias

[1] Sistema Estatal de Información, PRINCIPALES CULTIVOS EN EL ESTADO Y LUGAR QUE OCUPAEN EL CONTEXTO NACIONAL 2017, Zacatecas, 2017.
[2] FERNANDO NUEZ VIÑALS, EL CULTIVO DEL TOMATE, MEXICO D.F., 1999.
[3] M.J.A. Eng, A.M.I. Soliman, M.A. El-Nono, M.M. Mustafa, E.-A.M. Arif, FARM MACHINERY AND POWER MANFACTURING A TOMATO SEED EXTRCATING MACHINE, 2017.
[4] N.H.A. Rahim, A.N.H.M. Khatib, Development of pet bottle shredder reverse vending machine, Int. J. Adv. Technol. Eng. Explor. 8 (2021) 24–33. https://doi.org/10.19101/IJATEE.2020.S2762167.
[5] S. Dhakshina Kumar, S. Esakkirajan, S. Bama, B. Keerthiveena, A microcontroller based machine vision approach for tomato grading and sorting using SVM classifier, Microprocess. Microsyst. 76 (2020). https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103090.
[6] G. Liu, S. Mao, J.H. Kim, A mature-tomato detection algorithm using machine learning and color analysis, Sensors (Switzerland). 19 (2019). https://doi.org/10.3390/s19092023.
[7] N. El-Bendary, E. El Hariri, A.E. Hassanien, A. Badr, Using machine learning techniques for evaluating tomato ripeness, Expert Syst. Appl. 42 (2015) 1892–1905. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.09.057.
[8] M.J.A. Eng, M.E. El-Iraqi, ; S E El Khawaga, T.R. Awais, FARM MACHINERY AND POWER DESIGN AND FABRICATION OF AN EXTRACTION MACHINE FOR TOMATO SEEDS, 2012.
[9] M. Bagus Hermanto, B. Susilo, M. Lutfi, R. Damayanti, The influence of seed separation techniques and drying temperature in a dehumidified drying machine for tomato seed production, 2024 (n.d.) 67–77.

.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 15, pp. 195 - 211.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Diseño de un Sistema Semiautomatizado de Visión Artificial para Control de Calidad Aplicado en Blíster de Pastillas

Paulina Ruby Jiménez Solís, Kevin Javier Prado Maldonado, Umanel Azazael Hernández González, Jesús Álvarez Montufar y Flabio Darío Mirelez Delgado.

Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas (UPIIZ-IPN)
Ingeniería Mecatrónica
Zacatecas, Zac., México
uahernandez@ipn.mx

Resumen

En la producción moderna, detectar defectos rápidamente permite ahorrar costos al evitar que productos fallidos sigan avanzando en la línea y lleguen al consumidor de manera imperfecta. El control de calidad en la producción de blísteres de pastillas presenta retos de efectividad y productividad, por lo que, en el presente documento se plantea el diseño de una alternativa de automatización para el control de calidad de blíster de pastillas mediante visión artificial, realizando el diseño de los subsistemas que lo conforman, para mejorar la velocidad y precisión respecto a los sistemas manuales de control de calidad para el mismo fin. El prototipo se enfoca en realizar las verificaciones como lo son que el blíster no esté sellado al vacío, que no estén parchados o caducados, y además clasifique de manera correcta los blísteres que han sido verificados como consumible por el sistema.

Palabras clave: Blíster, control de calidad, Interfaz, semiautomatizado, visión artificial.

1. Introducción

En la fabricación actual, la detección temprana de defectos puede ahorrar costos al evitar que productos de calidad inferior salgan de la línea de producción y lleguen a los consumidores de manera incompleta. La velocidad y precisión de los sistemas de visión artificial superan la capacidad de los humanos para clasificar productos como "aceptados" o "rechazados" debido a diversos factores. Por ejemplo, las inspecciones visuales humanas en una línea de producción proporcionan una precisión muy alta durante un período de tiempo. El tiempo depende del operador, pero a medida que pasa el tiempo, la fatiga y la distracción son inevitables una vez que los productos son aprobados en la línea de producción [1,2].

El monitoreo y control de los procesos se está convirtiendo hoy en día en una parte fundamental para el desarrollo y sostenibilidad de procesos de la industria. El monitoreo se realiza mediante sensores eléctricos, electrónicos o visión artificial para determinar el estado de los procesos, sin embargo, existen empresas que no cuentan con un equipo potente para procesar grandes conjuntos de datos y tampoco tienen los recursos financieros para adquirir este tipo de tecnologías, por esto, se plantea desarrollar un prototipo para las medianas y pequeñas empresas, que requieran un control de calidad para la aplicación establecida, por medio de visión artificial [3,4]. Un ejemplo de ello es la industria farmacéutica, que maneja estándares muy estrictos de calidad en la producción y empaque de medicamentos, sin embargo, sus procesos manuales de inspección visual en las líneas de empaque son susceptibles a error humano, pudiendo resultar en deficiencias, fallos y defectos en los productos en cuestión. Es por esto que se propone desarrollar un sistema semiautomatizado de visión artificial para la inspección de blíster de pastillas. Este sistema emplearía cámaras y algoritmos de

procesamiento de imágenes para detectar defectos como blíster roto, parchado o abierto, blíster sellado al vacío o con producto caducado, siendo así un prototipo innovador, económico y completo.

Debido al incremento poblacional, las industrias se han visto en la necesidad de invertir más en sus centros de calidad para estos productos farmacéuticos, sobre todo, para aquellos que utilizan un empaquetado en blíster, pues éste ocupa el 65% del 100% de los medicamentos con este tipo de empaquetado, por lo que se han estado evaluando soluciones técnicas eficientes y eficaces que satisfagan los altos estándares para este tipo de empaquetado [5–7].

Algunos beneficios de implementar el prototipo son la reducción de mermas y errores humanos, precisión en detección de defectos, consistencia en los estándares de calidad, generación de reportes y métricas, aumento en la productividad de las líneas y liberación de personal para tareas de mayor valor agregado [8,9].

Cuando se requiera escribir un nuevo párrafo, se utilizará una sangría de 1 cm sólo en el primer renglón. Se dejará un renglón en blanco para separar los párrafos.

Generalmente, la introducción finaliza con alguna información relacionada al artículo o con algunas reflexiones sobre el resultado del trabajo que se está presentando. Al terminar una sección se dejarán dos renglones en blanco, antes de colocar el título de la siguiente sección.

2. Metodología

Se diseño un prototipo de un sistema para el control de calidad de blísteres por medio de visión artificial, para su aplicación en pequeñas industrias donde por diversas razones no se pueda adquirir un sistema de control de calidad para blísteres industrializado. El prototipo tiene como fin clasificar los blísteres como “aceptado” o “rechazado”, esta decisión se basará en la concatenación de tres factores:

1. Será admitido cuando el sistema de control de calidad asegure que los blísteres estén llenos de pastillas, en otras palabras, que el blíster no esté sellado al vacío.

2. Será verificado si el sistema corrobora que el producto en cuestión es consumible por el usuario, es decir, hará una comparación entre la fecha establecida en blíster (fecha de caducidad) y la fecha actual.

3. Será supuesto como aceptado solamente si el sistema no detecta irregularidades en el blíster, lo que significa que será admitido en el tercer factor si el blíster no está parchado, abierto o roto en su parte inferior.

El sistema de visión artificial hará uso de un sistema de iluminación, un sistema de captura de imágenes y el procesamiento de éstas. Las características de interés son los bordes de las pastillas, posibles grietas o huecos en el *lidding* del blíster, así como la fecha sellada en el blíster.

2.1 Diseño Conceptual

Teniendo en cuenta las funciones del sistema con base en las necesidades del usuario se realizaron una serie de diagramas IDEF-0 para poder definir el proceso que realiza el dispensador automático de medicamentos como se muestra en la Figura 1.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 15, pp. 195 - 211.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

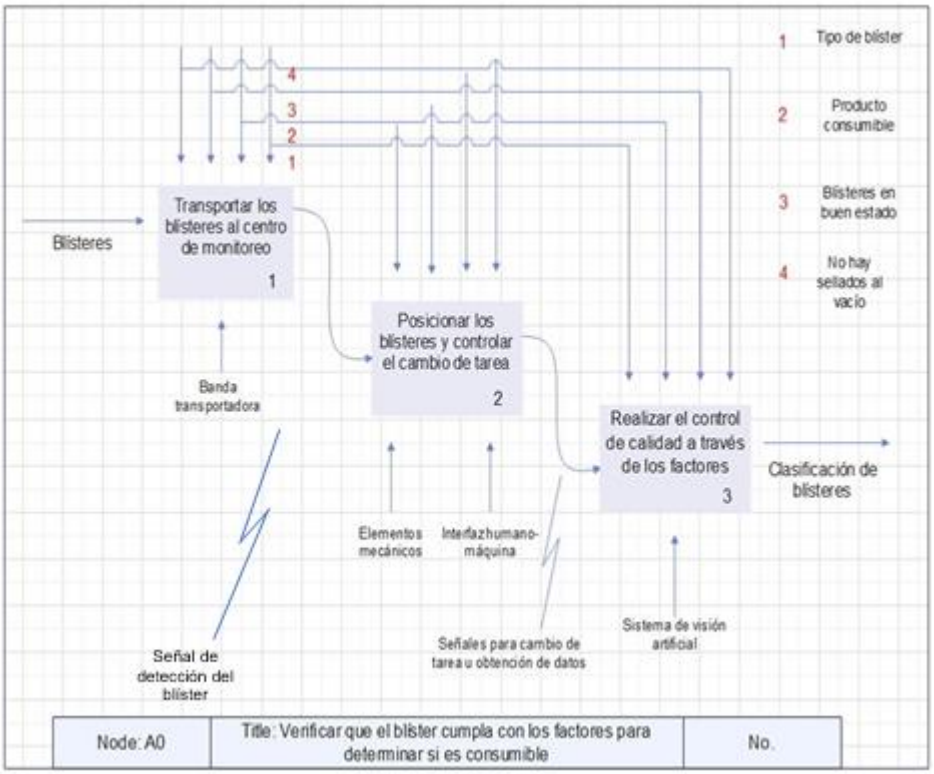


Figura 1. Diagrama IDEF A0.

El diagrama IDEF A0, donde los controles se caracterizan de la siguiente manera:

- Tipo de blíster. Se refiere al tamaño del blíster.
- Producto consumible. Dicho control es también conocido como control de caducidad, pues se encarga de realizar las comparaciones necesarias para evitar la venta y consumo de un producto caduco.
- Blísteres en buen estado. El buen estado de un blíster se determinará cuando el sistema de visión artificial contemple que el *lidding foil* del ya mencionado se encuentra en las condiciones más parecidas a las de un producto de fábrica, es decir, sin rayaduras, aberturas, parches.
- No hay sellados al vacío. El control del sellado al vacío es uno de los más importantes para el consumidor del producto, pues éste realiza las operaciones necesarias para decidir si un blíster está completo en porciones o dosis, o no.

Para entender el funcionamiento del prototipo se diseñó un diagrama de flujo (Figura 2), donde se muestra el algoritmo del proceso que necesita ser llevado a cabo por el prototipo para realizar su objetivo con éxito.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 15, pp. 195 - 211.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

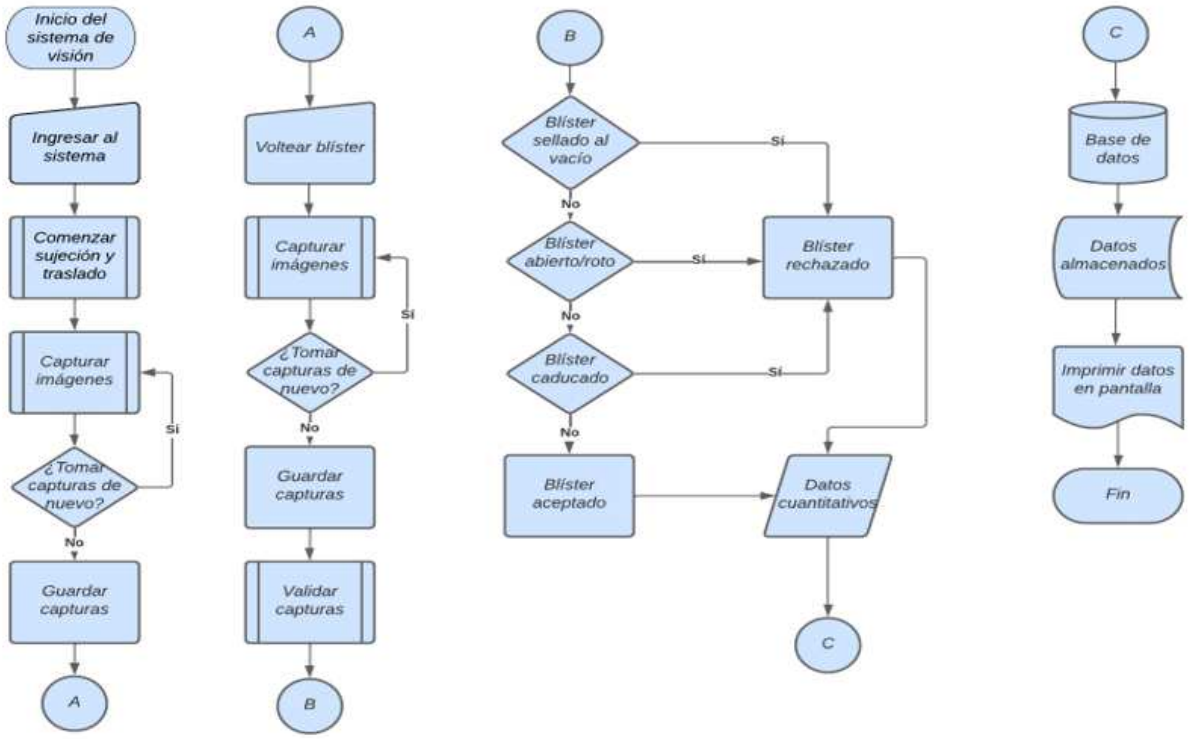


Figura 2. Diagrama de flujo del prototipo.

Para crear el prototipo de manera funcional, se realizó un análisis que permitiera delimitar correctamente todas las características y variantes del prototipo. Por ello, se muestra en la Tabla 1, las necesidades a cubrir.

Con base en la tabla de necesidades se desarrollo un diseño conceptual, donde se consideró como material como material base la lámina, un mecanismo de traslado y sujeción de riel que trabajará en conjunto con un sistema de volteo por pinzas. Contará con una cámara webcam para la captura de imágenes y su respectivo lenguaje de programación es el lenguaje C que controlará todos los procesos por medio de una tarjeta de control Raspberry, al mismo tiempo empleará sensores de presencia para el traslado y sujeción del blíster y una HMI de pantalla digital. Se utilizará un sistema de iluminación frontal y, por último, tendrá un sistema de clasificación por rueda giratoria. Todo lo anterior, puede verse representa en la Figura 3.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 15, pp. 195 - 211.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

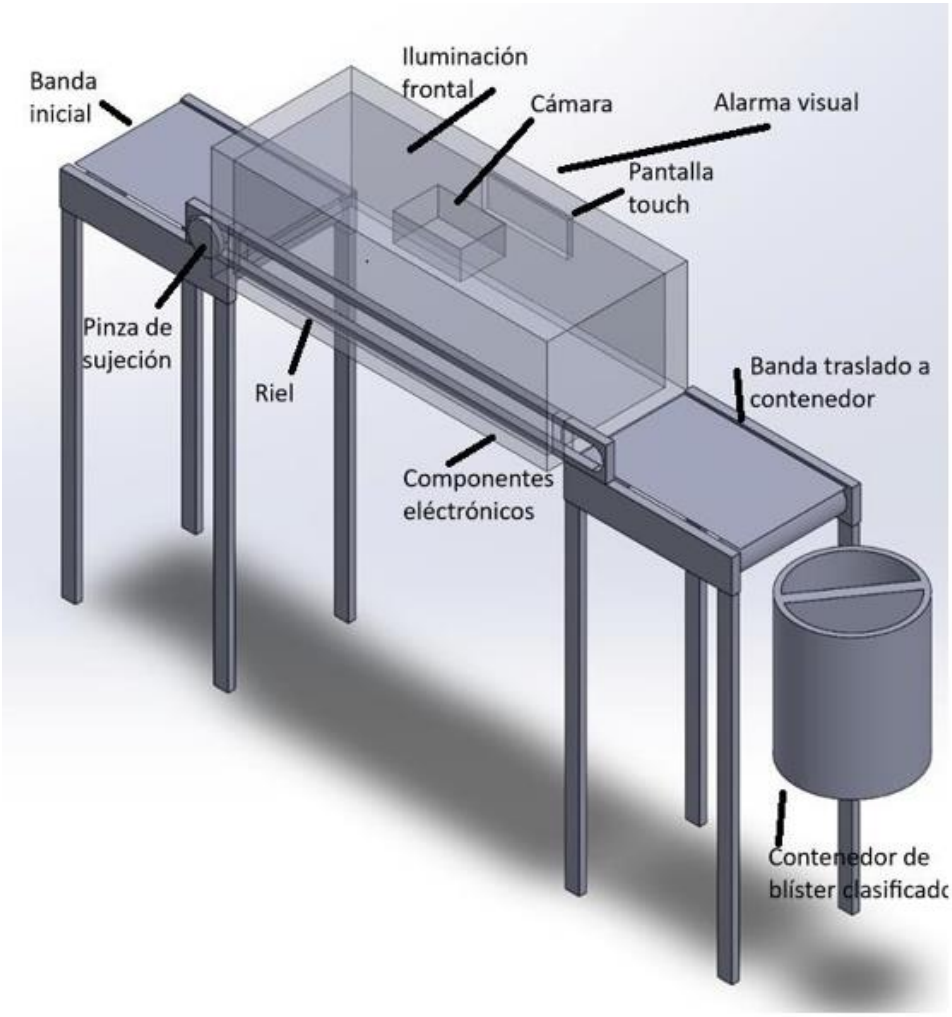


Figura 3. Diseño Conceptual.

El proceso de funcionamiento del sistema es sencillo e intuitivo. Éste al ser una herramienta que provee calidad a los blíster de pastillas, clasifica por medio de la concatenacion de los tres parámetros que se miden (qué el blister no esté roto o parchado, fecha de caducidad, blister sin sellados al vacío o ausencia de producto), si un blister es un positivos en alguno de los parámetros, automáticamente se convierte en un blister que no es consumible por el usuario, por lo tanto, éste blister será depositado en un contenedor especial para los blisteres rechazados; los blisteres serán clasificados en aceptados y rechazados, solamente aquellos que sean clasificados como aceptados serán puestos a disposición del usuario.

Tabla 1. Necesidades del sistema.

Nombre	Necesidad	Importancia
A	El prototipo deberá transportar los blísteres de un sistema a otro.	1
B	El prototipo contará con algún sensor que permita la activación de los diferentes sistemas.	1
C	El prototipo debe ser capaz de identificar la posición del blíster.	1
D	El prototipo cuenta con software como medio de comunicación usuario – máquina.	1
E	El sistema de iluminación debe ser constante y uniforme todo el tiempo.	1
F	La velocidad de transporte no interviene con ninguna tarea realizada dentro del prototipo.	2
G	Los actuadores empleados sujetan y sueltan de manera correcta los diferentes blísteres.	1
H	El sistema de visión debe de tener una resolución suficiente para la correcta captura del blíster.	1
I	El software del prototipo debe ser capaz de mostrar información para que el usuario accione las siguientes tareas.	2
J	La interfaz debe mostrar con un mínimo desface lo que sucede en el sistema de captura.	1
K	El prototipo debe ser seguro a la hora de ejecutarse.	1
L	El prototipo debe ser capaz de identificar las dimensiones del blíster.	1
M	El prototipo cuenta con un sistema de clasificación.	1
N	El software permite conocer la fecha de caducidad y que cada blíster cuente con todas las pastillas correspondientes, además de permitir conocer si el blíster está roto, parchado o abierto.	1
O	La HMI permite conocer datos estadísticos cuantitativos de los blísteres analizados.	1
P	La botonera digital es de uso intuitivo.	3
Q	La interfaz humano-máquina es capaz de dar información y recibir comandos.	1
R	El mecanismo de rotación y giro es preciso.	1
S	El prototipo es de costo accesible.	2
T	El prototipo tiene una instalación sencilla de realizar.	3

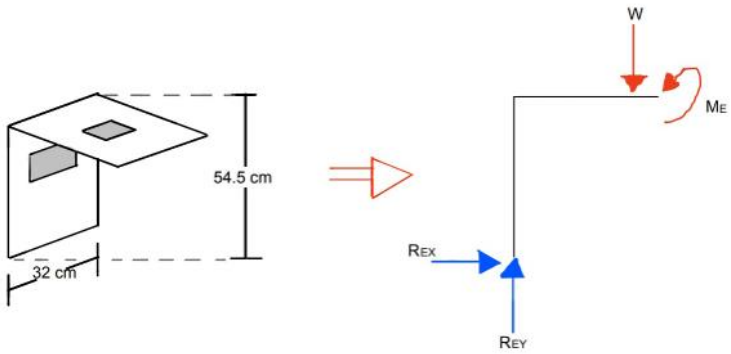
2.2 Diseño Mecánico

Para realizar el diseño de la estructura del sistema de visión artificial, se consideraron diversos factores para lograr un buen acabado visual, así como un sistema funcional y duradero. Consideraciones para la estructura:

1. Soportar peso de la cámara.
2. Soportar peso de la pantalla HMI.
3. Que no se deforme ni se doblegue.
4. Altura adecuada para la captura de imágenes.

Para asegurar que la forma y materiales de esta estructura sean funcionales para la aplicación es importante identificar qué tipo de movimiento tiene la estructura para determinar los cálculos que se le van a realizar, en este caso, por la colocación de la estructura, la parte fija de la misma y la posición de las cargas que tiene, se ejercerá un momento, el cual se representa en la Figura 4.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 15, pp. 195 - 211.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.



El momento es de $26.2607\ N * m$

Figura 4. Movimiento en la estructura.

Ya que el momento generado es un momento moderado para la aplicación, se decidió utilizar un recubrimiento de lámina para la estructura de calibre 20, ya que es una lámina resistente, dúctil y comercial.

En la Figura 5 se muestra la estructura para el sistema de visión, el cual se realizó con una estructura de varilla de 1/4 de in de diámetro, esto debido a que es la varilla más comercial y maquinable para la creación de estructuras fijas, además, se forró dicha estructura con la lámina de calibre 20 mencionada anteriormente.

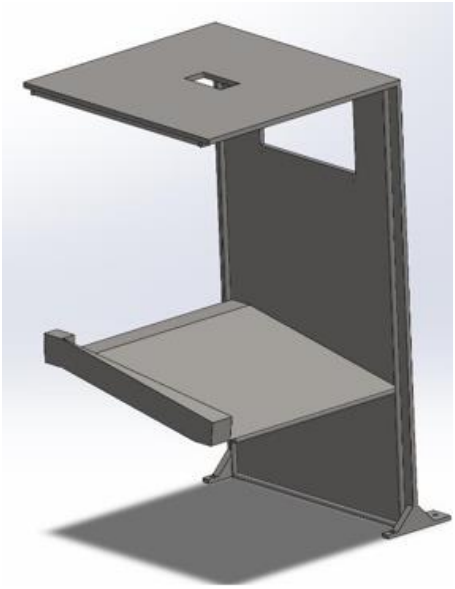


Figura 5. Diseño de la estructura del sistema de visión.

La banda transportadora es el subsistema que se encargará de trasladar el blíster al subsistema de sujeción y traslado, esto con el fin de posicionar correctamente el blíster para que la

pinza lo pueda sujetar debidamente, hacer el recorrido y capturas planeadas. En la Figura 6 se muestra el diseño del sistema de la banda transportadora.

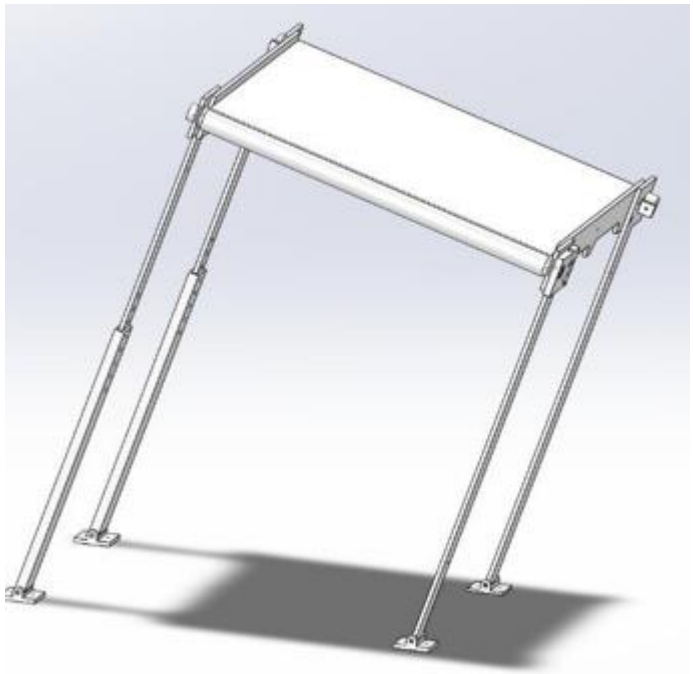


Figura 6. Diseño de banda transportadora.

La banda consta de cuatro patas que tienen la capacidad de inclinarse, gracias a que las patas traseras cuentan con un sistema sencillo de nivelación, además, tienen una geometría cilíndrica en el empotramiento que se introduce en los soportes fijos para permitir el movimiento sobre el eje Z de la estructura general de la banda transportadora. El subsistema en cuestión tiene dos rodillos que permiten realizar el movimiento de la banda de manera fluida:

- Rodillo motriz o tambor motriz. Es el rodillo que recibe la fuerza del motor.
- Rodillo de retorno o tambor conducido. Es el rodillo en el que gira y guía la banda. También es el rodillo que le da la tensión a la banda con ayuda de un tornillo que se ajusta a la tensión requerida sobre el eje X.
- Dos rodillos tensores en la parte inferior. Son los rodillos que tensan la banda.

Se añadió una delgada guía de soporte a la banda para evitar que el peso de la carga deforme la banda, ya que solamente se cuenta con dos rodillos tensores, pero no son rodillos de transmisión, logrando así, reducir costos de producción

Se diseño un subsitema de sujeción y traslado que esta conformado por El espárrago roscado, al cual se le llamará espárrago y que es el medio por el que se trasladará el blíster, desde la banda hasta el sistema de clasificación. La pinza, también conocida como gripper, que es la encargada de sostener el blíster durante todo el recorrido del espárrago y de darle la posición adecuada para la correcta toma de las capturas por el sistema de visión artificial.

Los soportes de las chumaceras, que son los cajones que cargan las chumaceras, el espárrago, la guía de traslado, la solera de los componentes electrónicos para detectar la posición de la pinza, el soporte de unión entre el espárrago y la guía de traslado, la pinza y, por último, la tuerca que actúa como carro de transmisión de movimiento. La estructura se planea que sea del mismo

material del que se diseñará la estructura del subsistema de visión artificial, es decir, de lámina calibre 20 de acero 1020. En la Figura 7 se muestra el ensamble completo de este subsistema.

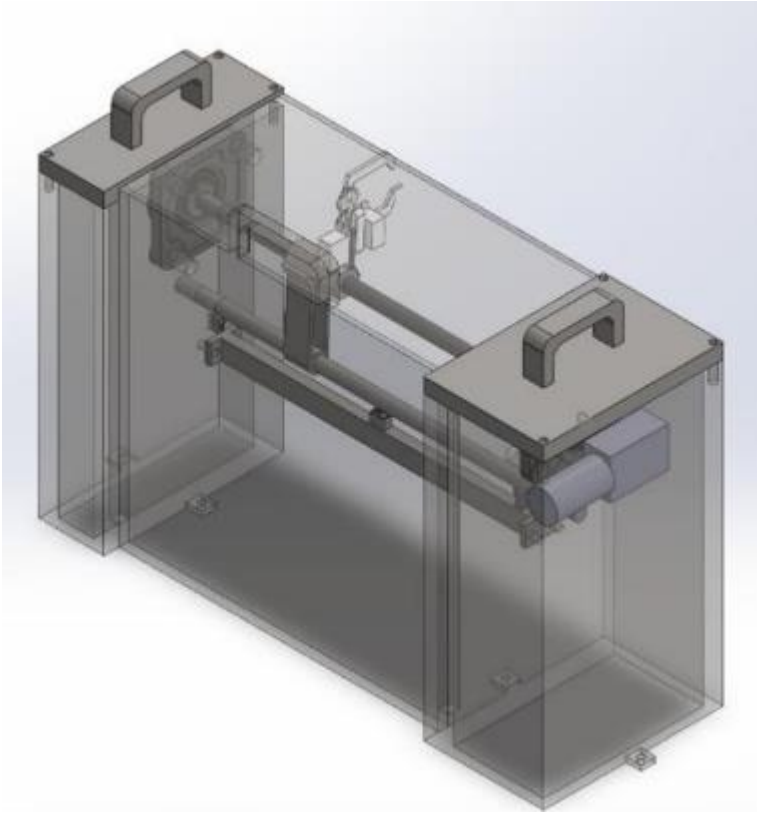


Figura 7. Ensamble completo del sistema de sujeción y traslado

El sistema de clasificación se conforma de un contenedor cilíndrico que es dividido en dos partes para separar los blísteres “aceptados” y “rechazados”, mediante una pared que será del mismo material que el cilindro y que superará la altura del cilindro para evitar que, al posicionarse para que caiga el blíster, se mezclen, esto por medio de un servomotor que será controlado por la tarjeta de control. Se optó por utilizar un servomotor debido a que la función a cumplir es solamente de posicionamiento por rotación. En la Figura 8 se muestra el sistema de clasificación.

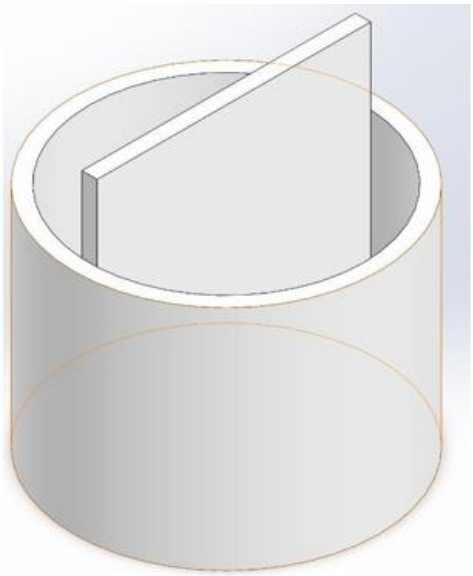


Figura 8. Sistema de clasificación.

2.3 Diseño de la Interfaz

La interfaz, permite que el usuario u operario interactúe con la máquina de manera precisa. Para este caso en particular la interfaz que se estará utilizando, tendrá la función de dar instrucciones a la máquina y a su vez podrá transmitir información de tipo cuantitativa y gráfica como se muestra en la Figura 9.

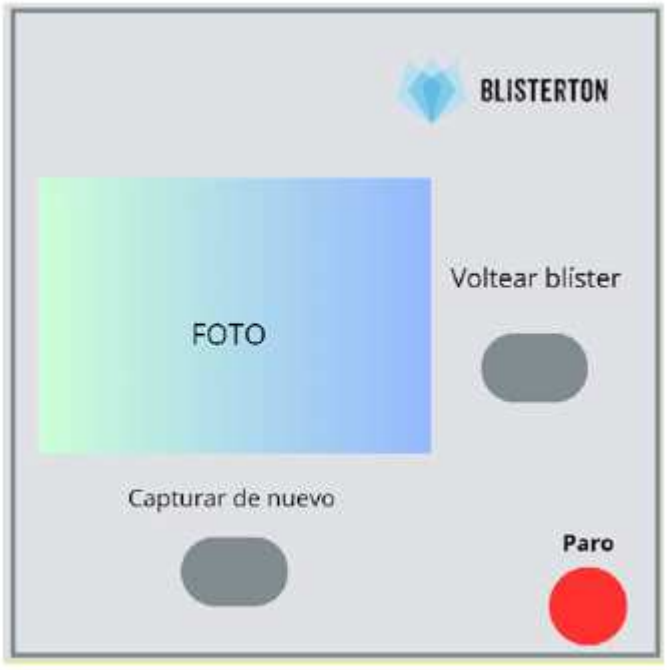


Figura 9. Pantalla de captura de imagen.

2.4 Diseño electrónico

Para el sistema eléctrico/electrónico del sistema se emplearon algunos elementos como:

Unidad de procesamiento. Entre las características que se tomaron en cuenta para la selección es que la unidad de procesamiento maneje una RAM de 8GB para cubrir correctamente la parte de visión artificial, por esto, se eligió una Raspberry Pi 4 de 8GB, ya que soporta la captura de imágenes de la cámara y las procesa rápidamente debido a que trabaja a 1.5GHz, cuenta con un software en el cual se puede crear y programar la HMI y conectar la pantalla directamente a la placa sin necesidad de algún driver externo.

Servomotores. Se realizó una investigación para determinar el servomotor adecuado para mover el contenedor del sistema de clasificación sin ningún problema por el peso que carga (que es el peso del contenedor más el peso de los blísteres que ya han sido clasificados) y que realice el giro adecuado de 180° para la correcta clasificación. Se determinó que el servomotor adecuado para hacer girar el contenedor es el MG995.Para el movimiento de la pinza, se seleccionaron servomotores más pequeños (respecto a la fuerza) debido a que el peso que se va a mover es menor al del contenedor de clasificación, dichos servomotores son el SG90.

Motores. En el prototipo se tendrán dos tipos de motores, uno que será el que proporcione el movimiento en la banda transportadora y otro que será el que haga girar el esparrago para el traslado de la pinza de un lado a otro, pasando por el sistema de visión y llegando al sistema de clasificación.

Driver para el motor. Para controlar el giro del motorreductor que estará dando el traslado de la pinza de un sistema a otro se requiere un *driver*, se seleccionó un puente H L298D el cual permitirá hacer el cambio de dirección de giro del motor para hacer el traslado de un lado y otro y regresarlo a su posición inicial.

Sensor de presencia. Se requiere de un sensor de presencia para detectar cuando haya blíster en la orilla de la banda transportadora para así detener la banda y que la pinza pueda agarrar el blíster sin que se llegue a dañar o caer, el sensor que se utilizará será el PIR HC-SR505.

Switches. Se requieren de switch final de carrera para detectar cuando la pinza haya hecho todo el recorrido y mandar la señal al puente H el cual hará la inversión del giro del motor y hacer el cambio de sentido en el avance de la pinza.

Cámara. Para el sistema de visión artificial se seleccionó una cámara que se pudiera conectar a la Raspberry y que haga buenas capturas para la comprobación de las condiciones del blíster; se seleccionó una cámara Logitech C920 la cual cumple con los requerimientos.

PCA9685. Para el control de los servomotores se seleccionó una PCA9685, la cual se conecta directamente a la Raspberry y mediante la comunicación del SDA (Serial Data Line) y el SCL (Serial Clock Line) se mandan los pulsos PWM que necesitan los servomotores para girar.

Pantalla. Se requiere de una HMI, que para el caso se hará uso de una pantalla *touch* que contará con la botonera para el manejo de toda la estación. Ésta es compatible con la Raspberry y se alimenta de la misma placa de procesamiento.

En la Figura 10, se muestra los esquemas completos de conexiones del sistema.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 15, pp. 195 - 211.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

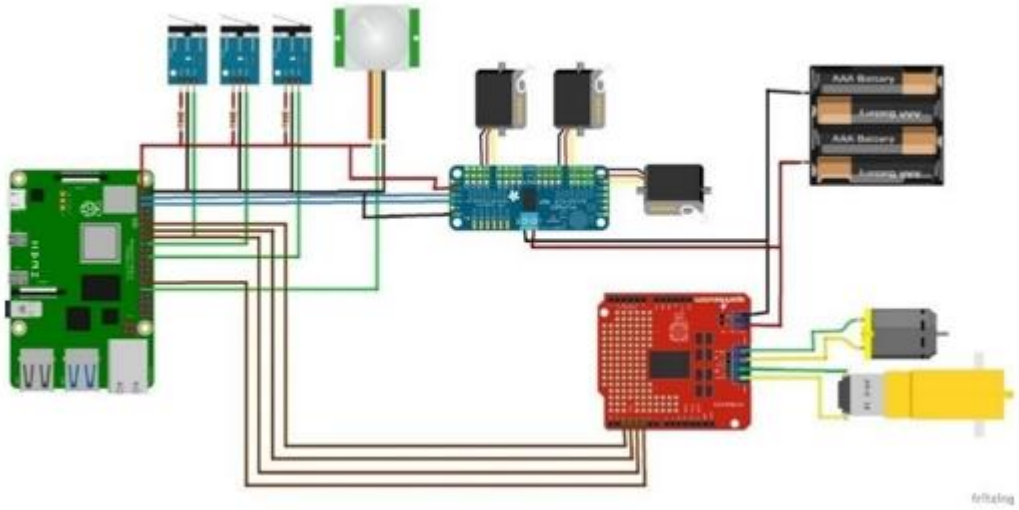


Figura 10. Esquema completo de conexiones.

2.5 Diseño del sistema de visión artificial

El proceso comienza con el inicio del sistema de visión artificial; se comienza con los procesos de adquisición de imágenes y procesar la imagen. Una vez que se captura la se procede a pasarla a escala de grises y hacer la umbralización, para asi encontrar los contornos de los blísteres y continuar con los procesos de control de calidad. Despues se verifica la caducidad del blíster, que no esté sellado al vació ni que esté abierto o roto y así avanzar hasta que el sistema clasifique si es un blíster aceptado o rechazado. En la Figura 11 se muestra el diagrama de flujo del proceso general que se necesita ser llevado a cabo por el sistema de visión para el correcto cumplimiento de los objetivos.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 15, pp. 195 - 211.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

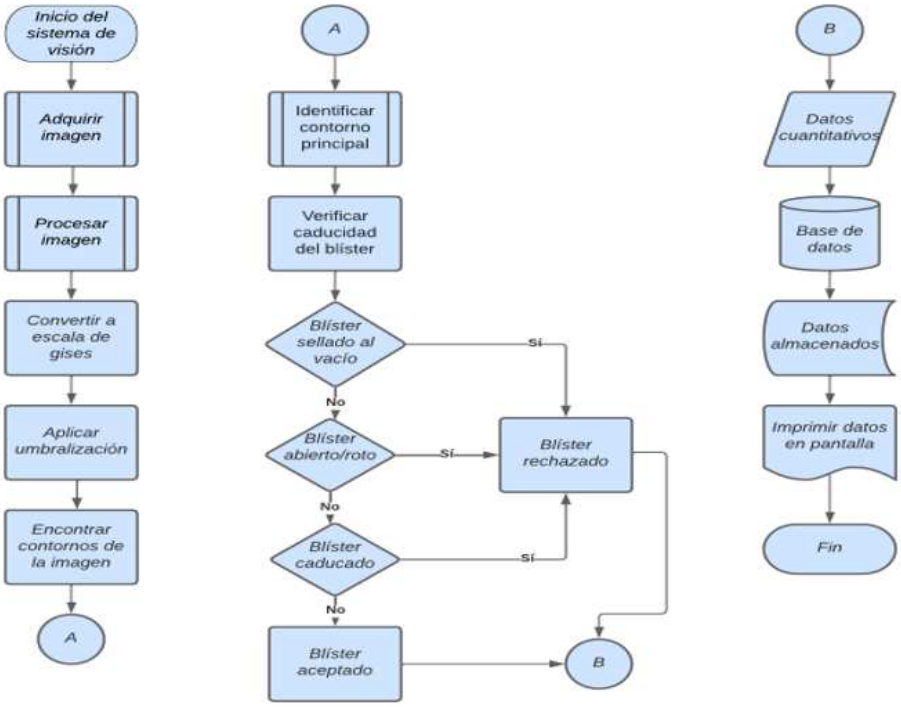


Figura 11. Esquema completo de conexiones.

3. Resultados

Durante el desarrollo de este trabajo se diseñó un sistema de visión artificial para el control de calidad de blíster de pastillas dentro de un rango de tamaños de 3 x 6 cm a 6 x 14 cm, empleando análisis digital de imágenes. A continuación, se describen los principales resultados alcanzados en los aspectos mecánicos, electrónicos y de interfaz del sistema.

Para el diseño mecánico del sistema se realizó un sistema de control de calidad de blísteres que opera con un flujo de derecha a izquierda. El prototipo tiene unas dimensiones reducidas de aproximadamente 90 x 60 x 60 cm, lo que representa una ventaja significativa en términos de tiempo y costo de instalación, así como en facilidad de manejo y mantenimiento. Estas características hacen que el sistema sea más eficiente y adecuado para instalaciones con limitaciones de espacio o que requieran una rápida implementación. En la Figura 12 puede observarse el diseño completo del sistema.

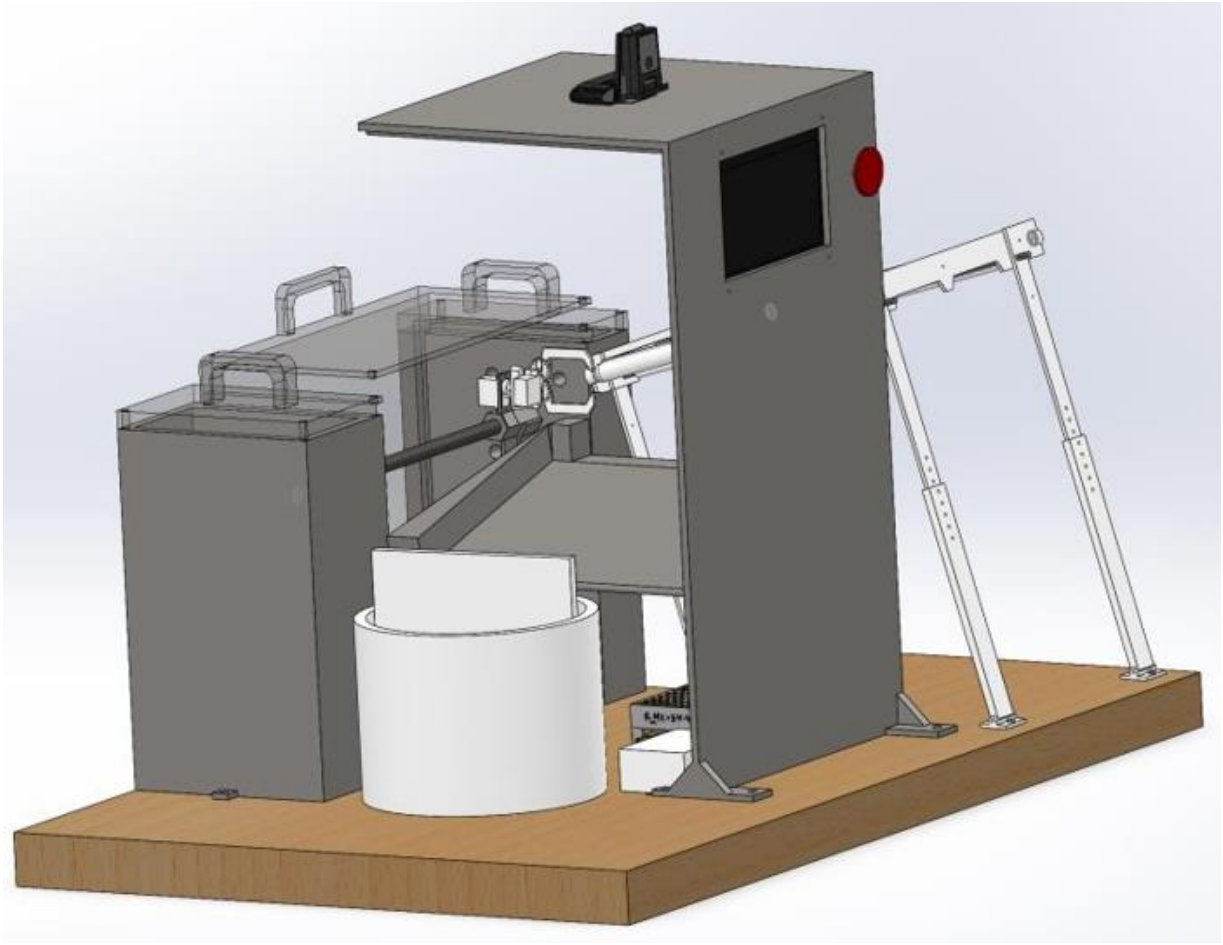


Figura 12. Sistema Completo Ensamblado.

La estructura para el sistema de visión se realizó con la altura necesaria para que la cámara detecte correctamente desde el blíster más pequeño hasta el más grande. En la Figura 13 se muestran las simulaciones estáticas que se realizaron para conocer si el material y la estructura son suficientes para soportar el peso total una vez que los componentes son colocados.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 15, pp. 195 - 211.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

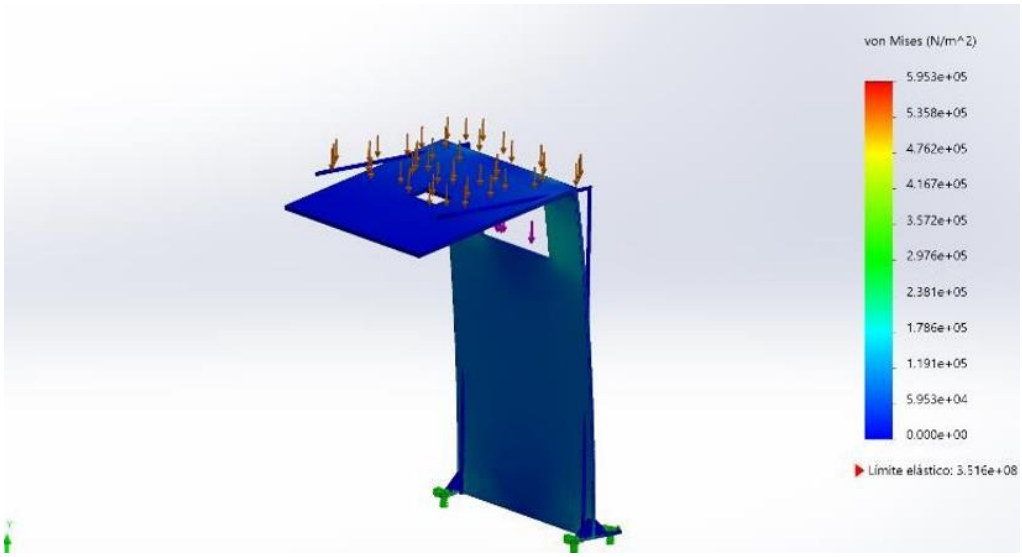


Figura 13. Simulación de tensión de la estructura del sistema de visión.

La deformación que presenta la estructura del sistema de visión artificial es de 0.042 mm lo cual es un desplazamiento pequeño generado por el poco peso que recubrirá.

En la Figura 14 se muestra el desplazamiento máximo que podría tener la banda, el cual es muy bajo, es decir, es una deformación muy pequeña por lo que se puede corroborar que el material resistirá el peso de la banda junto con el blíster más pesado y el motor que moverá la banda.

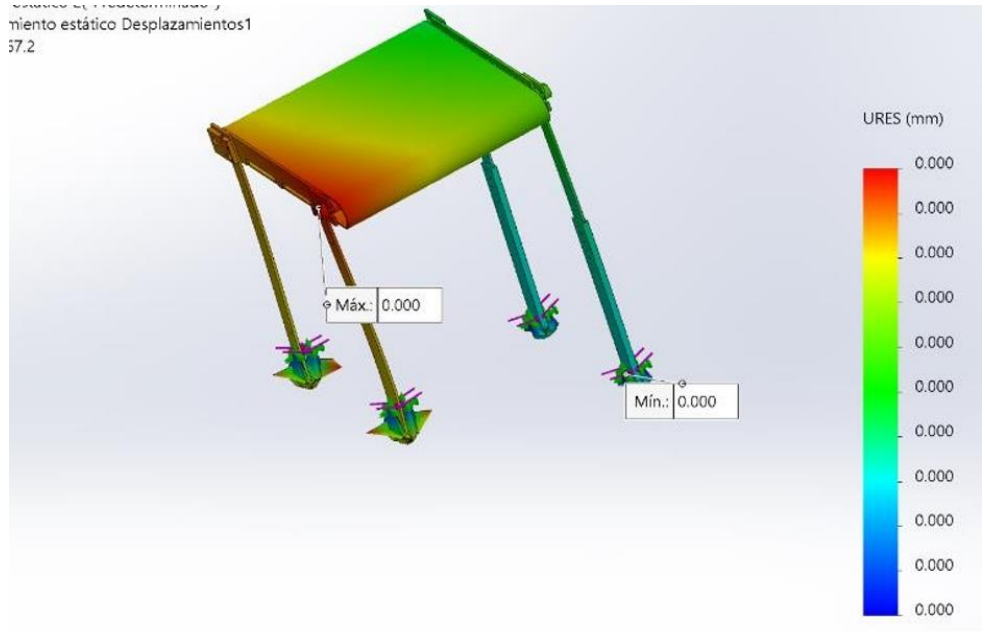


Figura 14. Simulación de deformación del material de la banda transformadora.

Se implementó un sistema electrónico que incluye componentes seleccionados para optimizar el rendimiento y la fiabilidad del sistema. Los materiales empleados fueron seleccionados considerando tanto la durabilidad como el peso, asegurando que el sistema sea lo suficientemente robusto para operar en entornos industriales y a la vez ligero para su fácil manejo.

Se desarrolló una interfaz de usuario intuitiva para la operación del sistema, que facilita el control y el monitoreo del proceso de control de calidad. Esta interfaz permite ajustar los parámetros de inspección según el tamaño de los blísteres en el rango especificado (3 x 6 cm a 6 x 14 cm), asegurando la identificación de defectos. Las imágenes capturadas son procesadas utilizando algoritmos de análisis de visión artificial que detectan de manera eficaz anomalías en el empaque de las pastillas, como la presencia de pastillas defectuosas o la falta de unidades.

4. Conclusiones

En el presente documento se tuvo como objetivo diseñar un sistema de visión artificial para control de calidad de blíster de pastillas dentro de un rango de tamaños de entre 3 x 6 cm y 6 x 14 cm, haciendo uso de técnicas de visión artificial mediante el proceso y análisis digital de imágenes, lo cual fue realizado de manera exitosa, pues, se llevó a cabo el diseño mecánico, electrónico, así como el diseño de la interfaz, resolución de cálculos y selección de materiales, siendo éstos los factores indispensables para implementar el comienzo de un nuevo proyecto.

Respecto al diseño mecánico, la estructura en general es un diseño único que tiene un funcionamiento de derecha a izquierda, siendo el primer sistema de control de calidad que funcione de esta manera, pues el resto de los sistemas para control de calidad funcionan de manera convencional, además de que sus dimensiones son proporcionales al tamaño de un adulto promedio, por lo que el peso aumenta, así como la dificultad de instalación, mantenimiento y tiempo de producción.

Este nuevo sistema tiene dimensiones pequeñas de al rededor 90 x 60 x 60 cm, por lo tanto, su tiempo y costo de instalación es menor respecto a los ya mencionados, así como la facilidad de manejo y mantenimiento a la máquina.

Cabe mencionar que, el diseño electrónico es sencillo, pues la mayoría de las complicaciones o decisiones difíciles se encontrarán en la programación de la tarjeta de control, la cual no se realizó debido a que dicha operación corresponde a la unidad de aprendizaje consecuente a ésta.
Sin embargo, los avances realizados son de suma importancia, ya que el sistema resultó ser un proyecto muy mecánico.

El diseño no es perfecto y tiene áreas de mejora como realizar modificaciones para que se pueda hacer una inspección con más de un blister a la vez, realizar un sistema de cámaras cruzadas para inspeccionar la parte superior e inferior a la vez y mejorar el tiempo de detección de fallas y la integración con IoT para conectar a la nube y hacer un monitoreo en tiempo real.

Referencias

[1] M.J. Villaseñor-Aguilar, M.G. Bravo-Sánchez, J.A. Padilla-Medina, J.L. Vázquez-Vera, R.G. Guevara-González, F.J. García-Rodríguez, A.I. Barranco-Gutiérrez, A maturity estimation of bell pepper (Capsicum annuum L.) by artificial vision system for quality control, Appl. Sci. 10 (2020). https://doi.org/10.3390/app10155097.

[2] C. Rosenberger, Calibration and quality control of cherries by artificial vision, J. Electron. Imaging. 13 (2004) 539. https://doi.org/10.1117/1.1760082.

[3] F. Adamo, F. Attivissimo, G. Cavone, N. Giaquinto, A.M.L. Lanzolla, Artificial vision inspection applied to leather quality control, 18th IMEKO World Congr. 2006 Metrol. a Sustain. Dev. 3 (2006) 1970–1972.

[4] J. Jia, T. Zhao, Z. Liu, Y. Liang, F. Li, Y. Li, W. Liu, F. Li, S. Shi, C. Zhou, H. Yang, Z. Liao, Y. Li, H. Zhao, J. Zhang, K. Zhang, M. Kan, S. Yang, H. Li, Z. Liu, R. Ma, J. Lv, Y. Wang, X. Yan, F. Liang, X. Yuan, J. Zhang, S. Gauthier, J. Cummings, Association between healthy lifestyle and memory decline in older adults: 10 year, population based, prospective cohort study, Bmj. (2023) 1–11. https://doi.org/10.1136/bmj-2022-072691.

[5] L. Armesto, J. Tornero, A. Herraez, J. Asensio, Inspection system based on artificial vision for paint defects detection on cars bodies, Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (2011) 3–6. https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980570.

[6] P. Korambath, J. Wang, A. Kumar, J. Davis, R. Graybill, B. Schott, M. Baldea, A smart manufacturing use case: Furnace temperature balancing in steam methane reforming process via kepler workflows, in: Procedia Comput. Sci., Elsevier B.V., 2016: pp. 680–689. https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.357.

[7] A. Zeid, S. Sundaram, M. Moghaddam, S. Kamarthi, T. Marion, Interoperability in smart manufacturing: Research challenges, Machines. 7 (2019). https://doi.org/10.3390/machines7020021.

[8] D. Wu, J. Terpenny, D. Schaefer, Digital design and manufacturing on the cloud: A review of software and services, Artif. Intell. Eng. Des. Anal. Manuf. AIEDAM. 31 (2017) 104–118. https://doi.org/10.1017/S0890060416000305.

[9] “Validating Software for Manufacturing Processes,” n.d.

.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 16, pp. 212 - 230.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Diseño de un Prototipo de Escáner-Copiadora de Documentos Braille

Domínguez Sánchez Sergio[1], Hernández González Umanel Azazael[1], Mirelez Delgado Flabio Darío[1], Chávez Almaraz Marlon[1], García Cruz Azalia Guadalupe[1], Sánchez Luévano Abril Natalia[1].

[1]Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Zacatecas., Zacatecas, México.
uahernadez@ipn.mx

Resumen

En el presente documento se describe la propuesta de diseño de un prototipo de un escáner-copiadora de documentos braille, la cual tendrá como principal función el escaneo por medio de visión artificial de textos en braille, para su posterior digitalización e impresión de relieve con un sistema electromecánico, siguiendo la norma de la Organización Nacional de Ciegos Españoles (ONCE) de distancia entre puntos con las que cuenta el sistema de lecto-escritura. Además, el prototipo contará con una Interfaz Humano-Máquina para que el usuario sea capaz de configurar el escaneo o la impresión según sean sus necesidades. Esto con el fin de facilitar su acceso a la comunidad como recurso de lectura y escritura braille, debido a que este tipo de impresoras tiene un costo poco accesible.

Palabras clave: Braille, carácter braille, discapacidad visual, embosado, impresión por relieve, visión artificial.

1. Introducción

La tecnología ha tomado un rol importante en el desarrollo de productos con el fin de integrar a los diferentes miembros de la sociedad, como la población con discapacidad visual, quienes usan comunicación en sistema braille. Sin embargo, muchos de estos productos no están al alcance de cualquier individuo, pues tienen alto valor monetario [1,2]. Existen diversos tipos de discapacidades, como las que afectan a: la audición, la vista, el movimiento, el razonamiento, la memoria, el aprendizaje, la comunicación, la salud mental y las relaciones sociales. En las últimas décadas, la atención a las personas con discapacidad ha aumentado considerablemente debido a la promoción desde los derechos humanos en referencia a los grupos más vulnerables y al posible incremento a medio y largo plazo asociado a la presencia de discapacidad entre la población, como consecuencia del envejecimiento demográfico y la transición epidemiológica [3,4].

La ceguera es una enfermedad visual, se produce debido a diversos factores físicos o neurológicos. Puede producirse al nacer, debido a un accidente o a otras enfermedades [5,6]. El acceso a la información es uno de los aspectos más importantes de la educación en todos los niveles educativos; por esta razón las personas con o sin debilidad visual deben conocer la importancia que tiene el sistema braille para facilitar el acceso a escritos, al cálculo, a la música y literatura [7,8].

Según el censo de población y vivienda del INEGI en 2020, en el estado de Zacatecas se calculan 185,166 personas con limitación o discapacidad para ver aun usando lentes, además, con un rango de 12 años y más, se tienen reportes de 1,204,971 personas con discapacidad visual total que saben leer y escribir en México. Sin embargo, existen inconvenientes en la educación en este sector dada la dificultad al acceso a la información escrita. La lectura es una capacidad imprescindible tanto en el ámbito escolar como para acceder a la riqueza e información cultural humana [9].

En la capital zacatecana, en la biblioteca “Roberto Cabral del Hoyo” se tiene un acervo de 560 libros en braille, los cuales han sido conservados desde su impresión en 1961. En ella se ha sostenido alrededor de 25 años un proyecto de educación en lectura y escritura braille liderado por el Licenciado en educación especial en el área de ceguera y debilidad visual Ricardo Vela Vicencio; quien ha expresado la dificultad en conseguir reemplazos a libros dañados por el uso y paso del tiempo, ya que este material es traído desde imprentas en otros estados y las impresoras braille son muy costosas [10].

2. Metodología

Se realizo el diseño de un escáner-copiadora de documentos braille, el cual contará con un sistema de visión artificial para la digitalización del archivo, una interfaz humano-máquina para seleccionar el proceso e indicar al usuario el estado del proceso, un sistema mecánico que permita imprimir los puntos sobre la hoja, y un sistema de control de posicionamiento para el efector final. El funcionamiento de cada uno de estos elementos se describe brevemente a continuación:

- La impresión por relieve de los caracteres braille será realizada por un mecanismo, el cuál realizará los movimientos necesarios para embosar puntos sobre la hoja.

- El sistema de visión artificial será utilizado tanto para el proceso de escaneo como de copiado. Este sistema identificará la posición de los puntos en la hoja ingresada para determinar los caracteres braille equivalente.

- La posición del carácter a colocar se determinará mediante un sistema de control que determinará la ubicación y acción del efector final.

- La interfaz humano-máquina permitirá al usuario escoger el proceso que el dispositivo debe realizar, con las opciones siendo escaneado o copiado. En el caso de copiado, permitirá también escoger el número de copias. Durante el procesamiento, la interfaz indicará al usuario el estado del proceso, y el tiempo estimado restante de la tarea.

El comportamiento general del sistema se aprecia en la Figura 1.

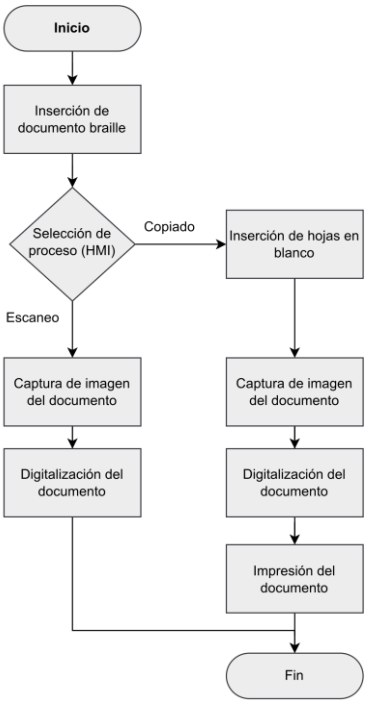


Figura 1. Funcionamiento del Sistema.

2.1 Especificaciones de diseño

Se plantea la descripción del prototipo de escáner-copiadora de documentos braille por medio de diagramas IDEF0. En la Figura 2 se aprecia el diagrama A0.

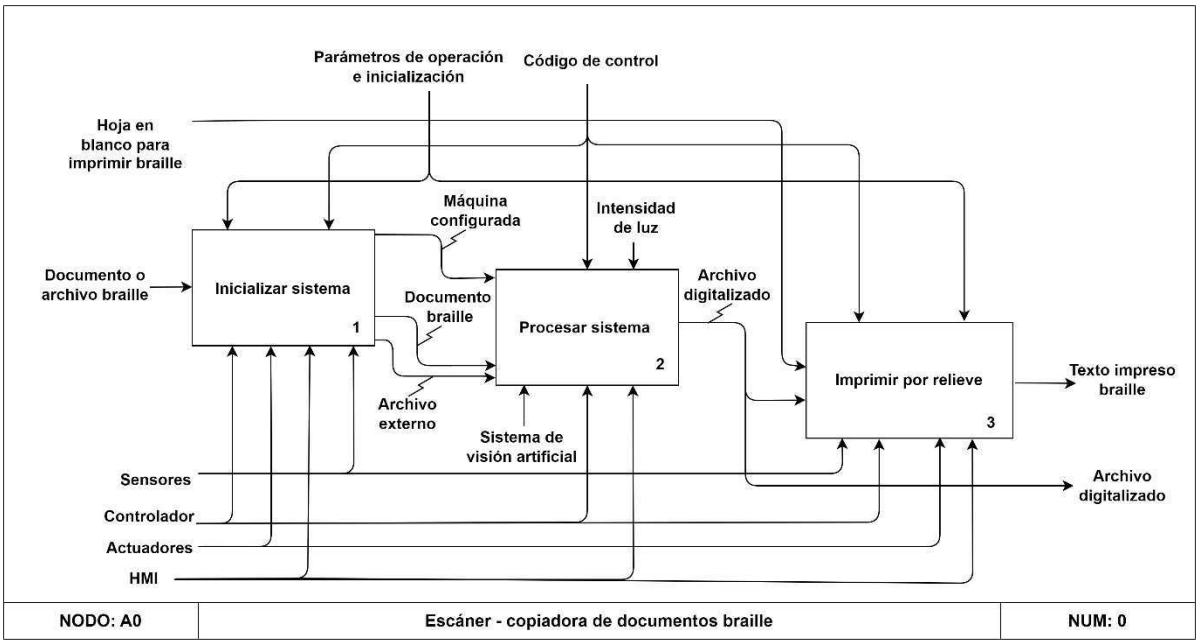


Figura 2. Diagrama IDEF 0 del sistema.

Se realizo un análisis donde se identificaron las principales necesidades que debe cubrir el sistema. En la Tabla 1 se muestran estas necesidades.

Tabla 1. Identificación de necesidades.

No.		Necesidad	Importancia
1	El sistema	Debe tener un costo competitivo	3
2	El sistema	Debe ser capaz de digitalizar documentos tipo braille.	1
3	La digitalización	Debe ser precisa.	1
4	El sistema	Debe ser estético.	4
5	El sistema	Debe ser capaz de marcar el relieve sin perforar.	1
6	Los caracteres	Deben seguir las normas de la Organización Nacional de Ciegos Españoles del sistema Braille.	1
7	La interfaz	Debe ser intuitiva para el usuario.	1
8	El sistema	Debe tener una iluminación adecuada para el escaneo.	1
9	El sistema	Debe de ser capaz de realizar el número de copias requeridas por el usuario.	3

Se realizo un diseño conceptual para que sea más fácil realizar el diseño del sistema. El diseño conceptual destaca por el movimiento de la hoja en el sistema de impresión, esto debido a que cuenta con rodillos que permiten que la hoja se vaya desplazando; el movimiento de los rodillos es generado por medio de motores a pasos, los cuales son colocados a las orillas de los rodillos. Tiene un actuador con dos grados de libertad, el cual realiza el embosado en la hoja mientras se va desplazando. El actuador de impresión está formado por dos servomotores lineales, los cuales embosan los caracteres en el papel de dos puntos a la vez.

En el sistema de escaneo, la iluminación seleccionada para este diseño es iluminación de campo oscuro, la cual contará con una cámara infrarroja en la parte inferior, la hoja en la parte media, y dos luces del lado contrario de la cámara a aproximadamente 45 grados hacia la hoja cada una. El diseño cuenta con un panel táctil como HMI, en donde se podrán escoger las opciones que el usuario desee para su impresión o escaneo. Para el diseño de la carcasa exterior, se tomó como opción el uso de una chapa metálica. En la Figura 3 se muestra el diseño conceptual.

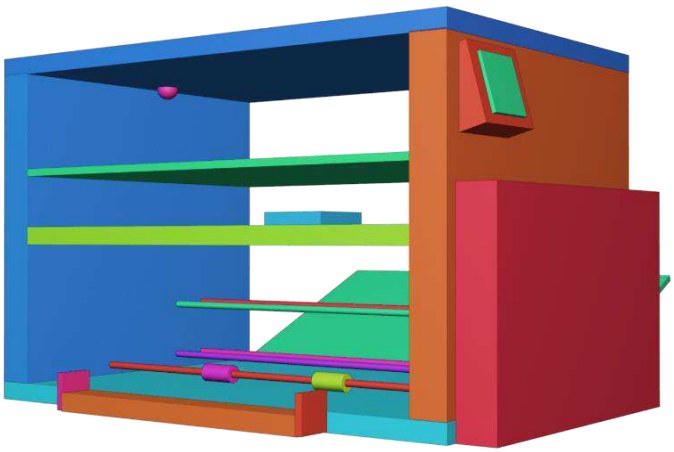


Figura 3. Diseño conceptual.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 16, pp. 212 - 230.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

2.2 Diseño cinemático

Para garantizar que el posicionamiento del actuador sea preciso, se diseñó el control del sistema, por lo que se utilizó al algoritmo de Denavit-Hartenberg (DH) para determinar sus parámetros cinemáticos y dinámicos. Se modeló como un robot cartesiano de dos grados de libertad, el primero de ellos provisto por el eje móvil y el otro por los rodillos que mueven la hoja. Dado que no es de interés controlar la extensión del efector final, que en su lugar será usado como un actuador todo-nada, no se ha considerado como un grado de libertad adicional.

En la

Figura 4 se muestra la abstracción de los eslabones de la máquina y sus ejes según el algoritmo DH:

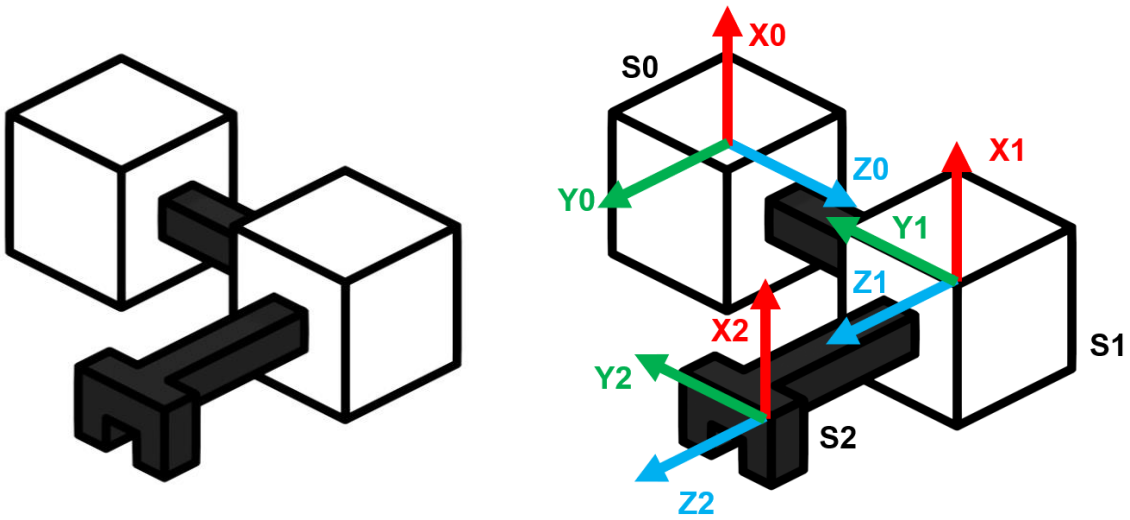


Figura 4. a) Representación de los eslabones de la máquina. b) Ejes de movimiento colocados mediante el algoritmo de Denavit-Hartenberg.

Con esto es posible completar la tabla de parámetros de DH (Tabla 2):

Tabla 2. Parámetros de Denavit-Hartenberg para el sistema cinemático.

Eslabón	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	0	q_1	$-l_1$	$-\pi/2$
2	0	q_2	0	0

En la que q_1 y q_2 son las coordenadas generalizadas de cada eslabón, en este caso representando su desplazamiento longitudinal y trasversal, y l_1 es la distancia vertical entre el eje de los rodillos y el del efector. Teniendo esta tabla de parámetros, es posible obtener las matrices homogéneas de cada eslabón, mostradas en (1) y (2):

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -l_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Y con ello se obtienen las matrices de transformación, que resultan de multiplicar las matrices homogéneas hasta el eslabón deseado, mostradas en (3) y (4):

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -l_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T = T_0^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -l_1 \\ 0 & 0 & 1 & q_2 \\ 0 & -1 & 0 & q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Mediante esta matriz de transformación será posible indicarle al efector final la posición deseada. Para garantizar que en la práctica esto se cumpla, se propone el controlador proporcional con retroalimentación de velocidad de lazo cerrado mostrado en la Figura 5 para eliminar el error de posición en la salida.

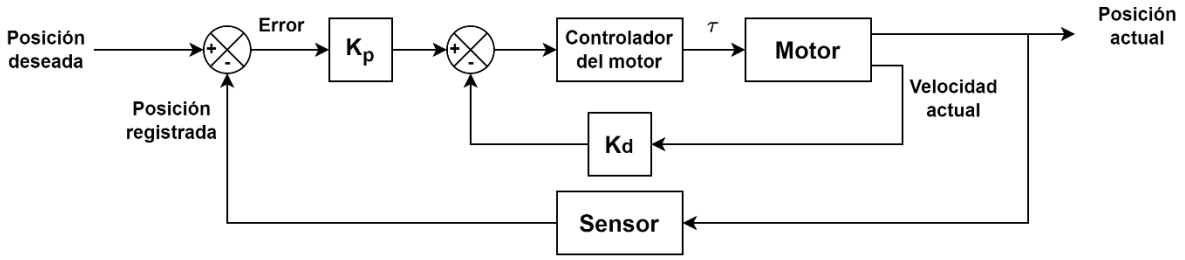


Figura 5. Diagrama de bloques del controlador propuesto.

2.3 Diseño mecánico

Dentro del diseño del sistema mecánico, se consideraron tres principales sistemas, los cuales son el efector final, el sistema de movilidad del efector final y el sistema de movilidad de las hojas.

Para el efector final se decidió realizar un arreglo de tres micro servomotores lineales, los cuales realizaran un barrido lateral para realizar el embosado, el acomodo planteado para el arreglo se muestra en la Figura 6.

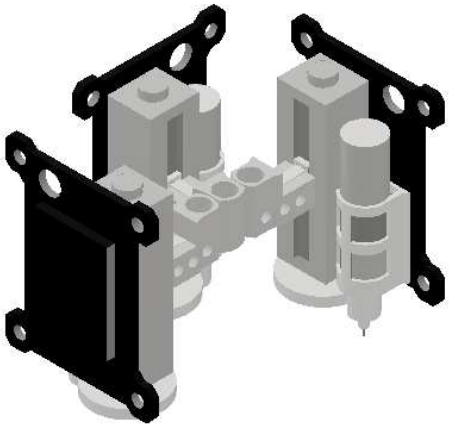


Figura 6. Posicionamiento de la celda de servomotores.

Para el movimiento del efector se diseñó un mecanismo partiendo de un tornillo sin fin, en el que el elemento móvil contiene los actuadores en el posicionamiento deseado, generando el movimiento longitudinal necesario para el barrido transversal, esto por medio de motores a paso, debido a que se necesita precisión en el movimiento, principalmente por las normas de los caracteres braille. El mecanismo se aprecia en la Figura 7.

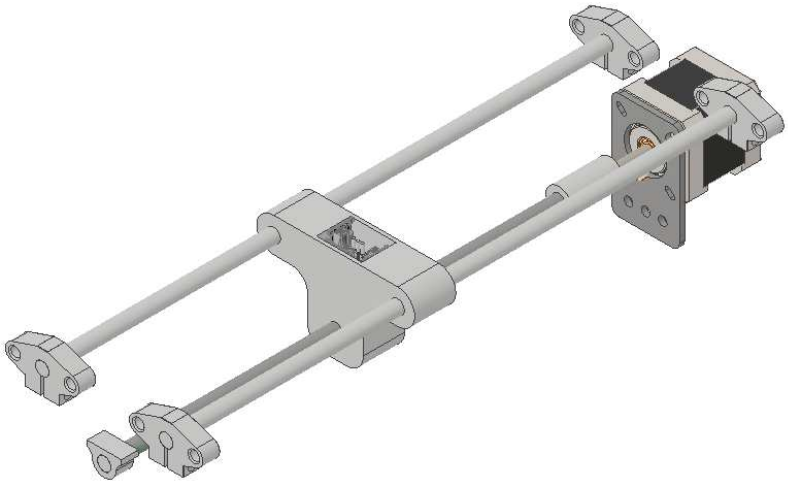


Figura 7. Mecanismo de movilidad del efector final. Vista isométrica inferior.

Dado que con la solución planteada las hojas son móviles e independientes del sistema del efector, se diseñó su propio sistema para proporcionar su movimiento. Cuando una hoja es ingresada a la máquina, esta levanta una palanca que activa un interruptor de final de carrera, lo que comunica al sistema su presencia. El movimiento de la hoja es proporcionado por rodillos de plástico con juntas tóricas de goma, y se restringe su movimiento en otros grados de libertad mediante guías laterales. El mecanismo se aprecia en la Figura 8.

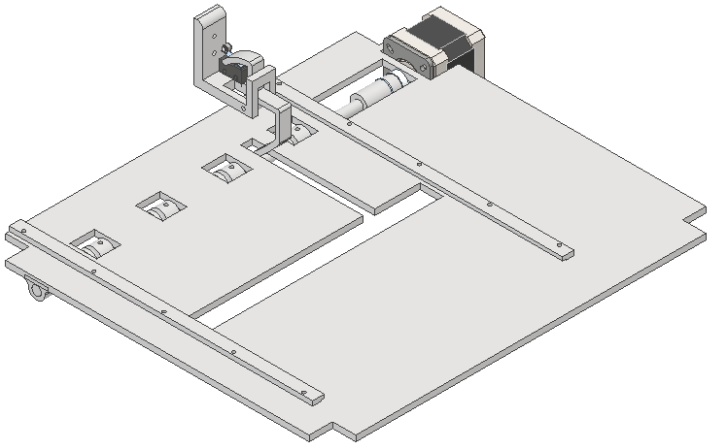
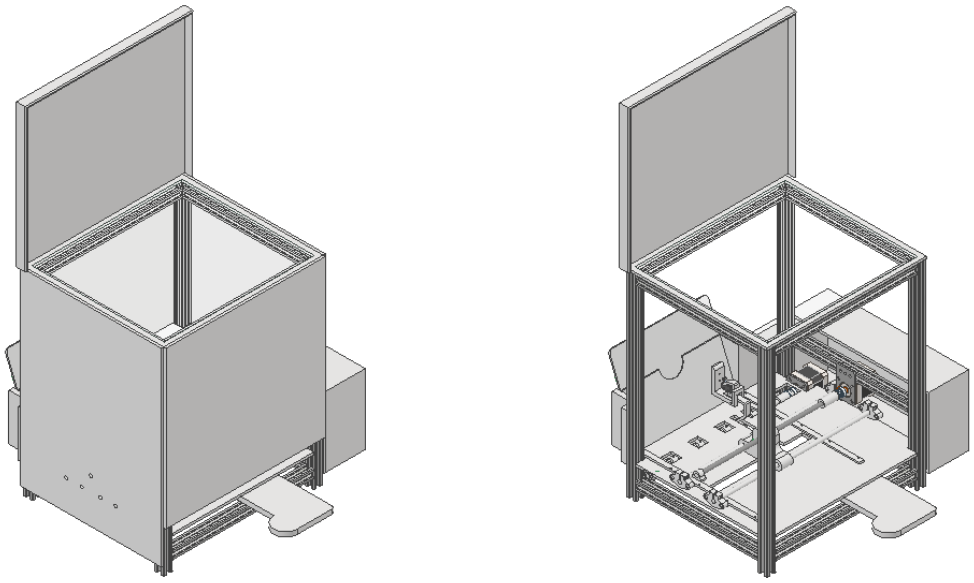


Figura 8. Sistema de movilidad de las hojas.

Finalmente, para la estructura final en la que se unen todos los sistemas, se optó por realizar una estructura extrusión de aluminio 2020. Sobre estos perfiles se colocarán los soportes de los motores, la plancha de impresión, la plancha de la cámara, el cristal de escaneo y las paredes exteriores, tal como se muestra en la Figura 9.



a) *b)*

Figura 9. a) Vista isométrica del sistema. b) Vista sin las paredes exteriores.

2.4 Diseño electrónico

Teniendo en consideración el diseño conceptual escogido, se realizó la selección de algunos componentes electrónicos como:

- Tarjetas de programación: Raspberry Pi 4 modelo B y Módulo ESP32 WROOM 32.
- Motores: Nema 17 y micro servomotores lineales GS-1502.
- Driver A4988 DRV8825.
- Sensores: CNY70 y finales de carrera.
- Fuente de alimentación de 12 V y 5 A.

Para el movimiento del mecanismo se utilizaron los motores NEMA 17; mientras que, para la punción generada por el actuador, se hizo uso de servomotores lineales; para el manejo de los motores NEMA 17, se utilizó el driver A4988 DRV8825; los finales de carrera se agregaron con el propósito de identificar cuando los actuadores se encuentren al límite y evitar colisiones; asimismo, los sensores CNY70 se utilizaron con la finalidad de identificar la posición de la hoja.

Se realizó el diseño de una PCB que sirva para la interconexión de los diferentes componentes y módulos que se decidieron utilizar, esto con la finalidad de tener una conexión más estable. En la Figura *10* se muestran las conexiones realizadas en el circuito eléctrico, mientras que en la Figura 11 se muestra el diseño final y en la

Figura 12 el diseño 3D de la PCB.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 16, pp. 212 - 230.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

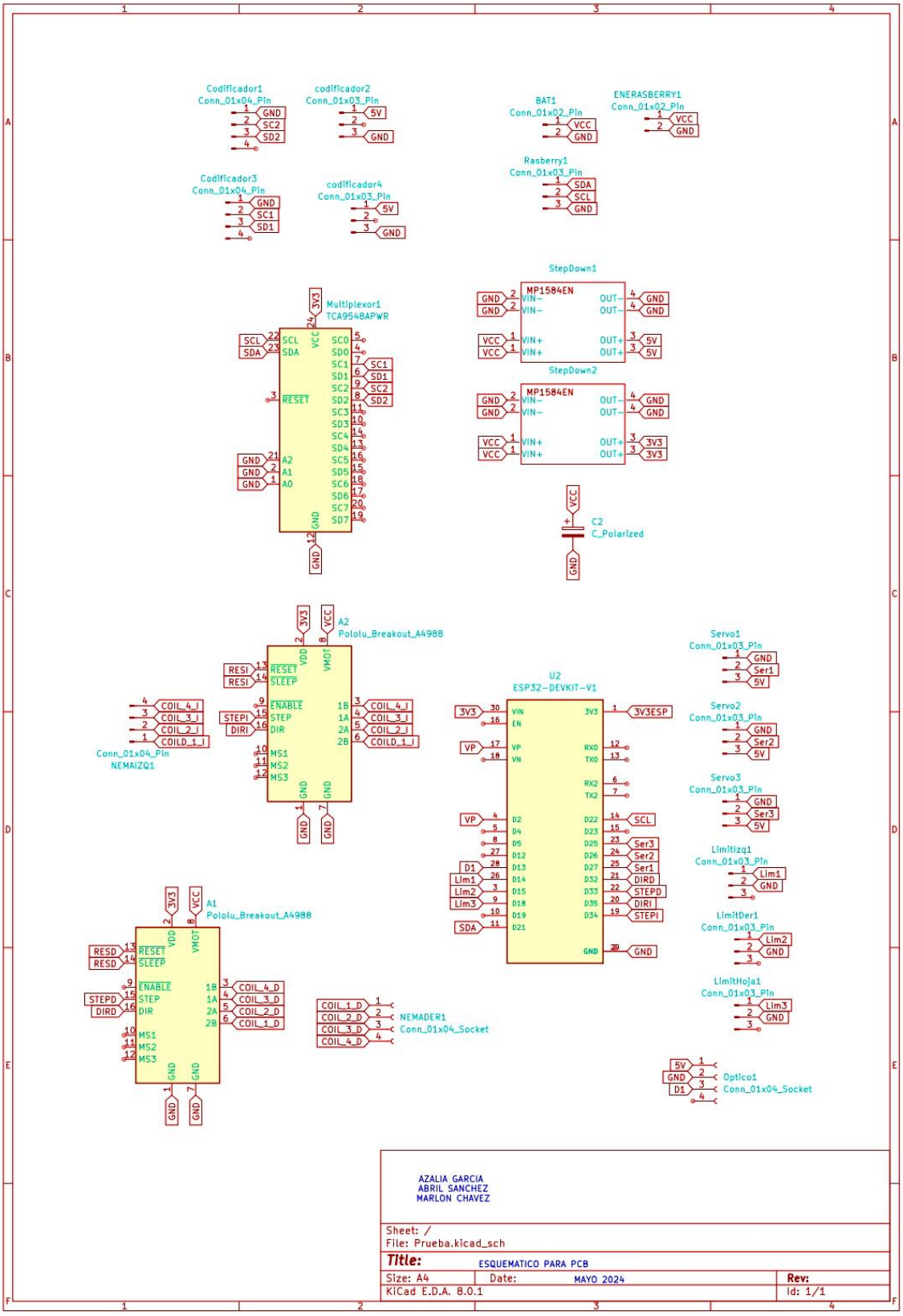


Figura *10*. Esquemático del circuito.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 16, pp. 212 - 230.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

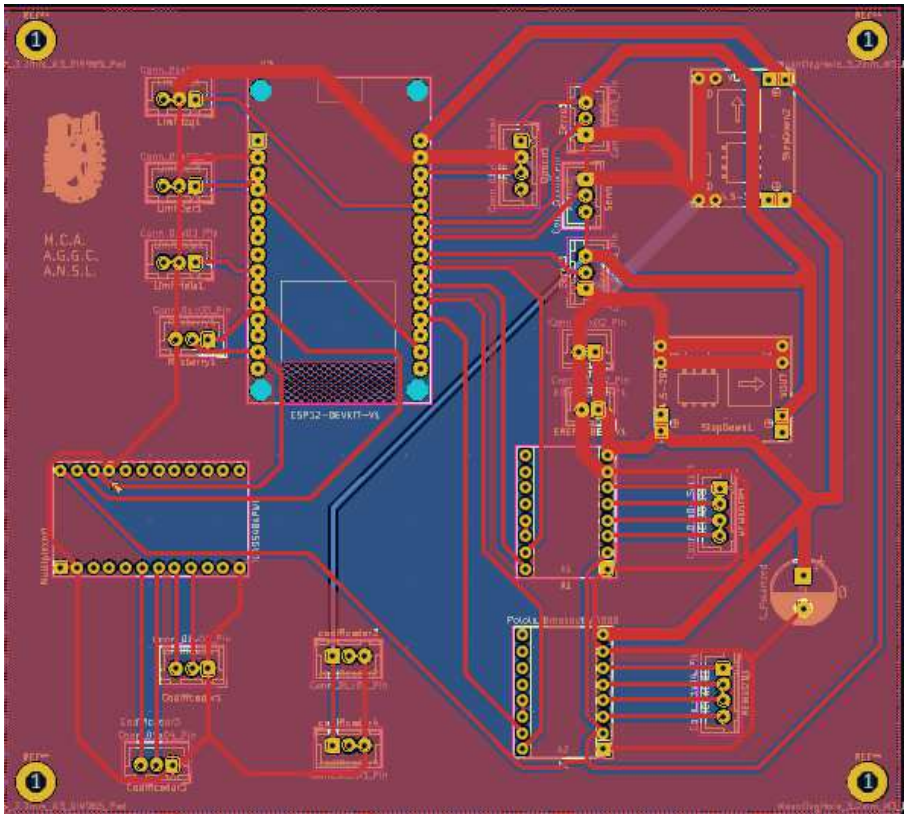


Figura 11. Diseño final de PCB.

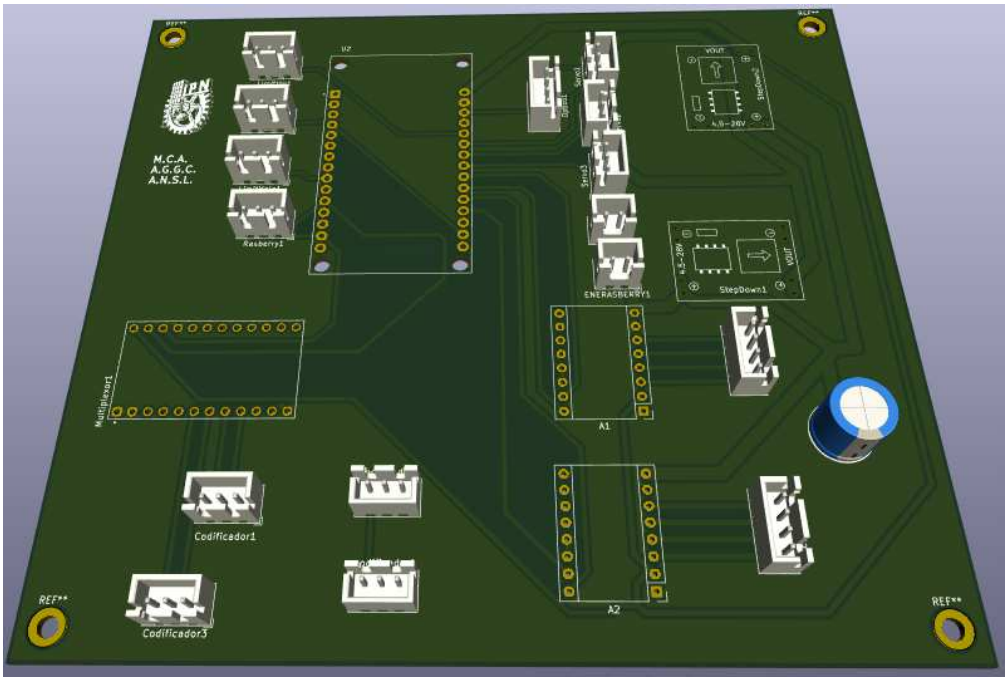


Figura 12. Diseño PCB 3D.

2.5 Diseño de sistema de visión artificial

Para el sistema de visión artificial, se planteó el desarrollo mediante el cual será captada la imagen del documento braille a escanear y su procesamiento para obtener los datos deseados para la digitalización del documento y su posterior duplicado por medio del sistema de impresión por relieve.

Con las consideraciones anteriores, se describe el diagrama de flujo de la Figura 13, comenzando por la captura de la imagen, la cual luego es convertida a escala de grises. Dado que la cámara escogida es de gran angular, se realiza una corrección de perspectiva antes de la detección. Se aplican después filtros para la detección de bordes, selección de los contornos de los puntos, corte del resto de la información que no será utilizada en el procesamiento, normalización y binarización de la imagen para obtener la ubicación de cada punto y seguir con el proceso de digitalización del documento, de forma que el siguiente proceso sea realizar el duplicado de la hoja escaneada.

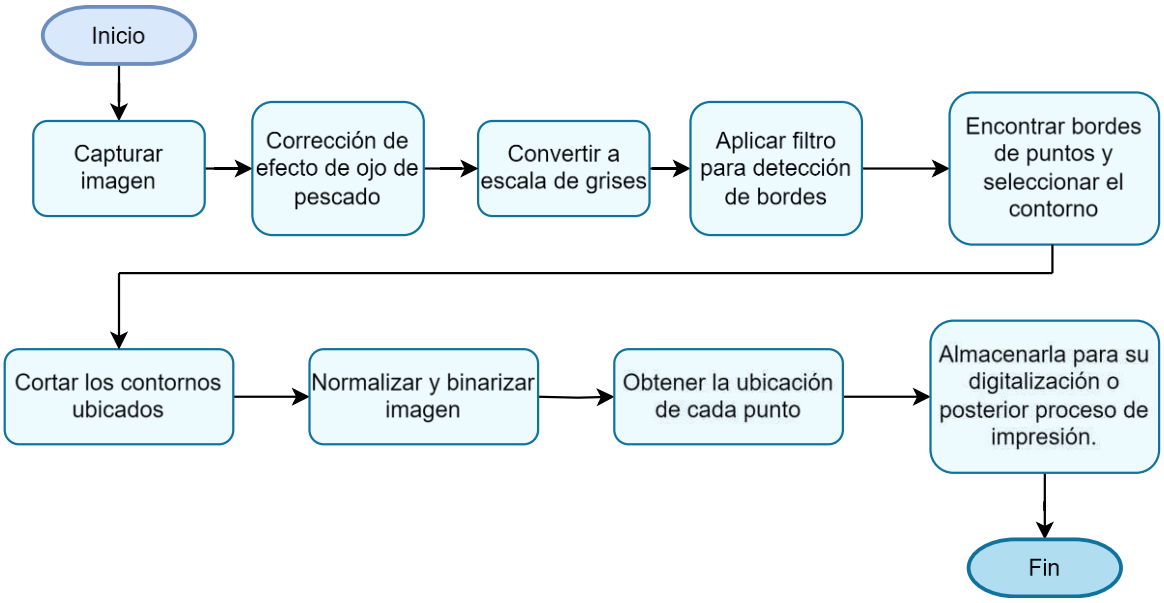


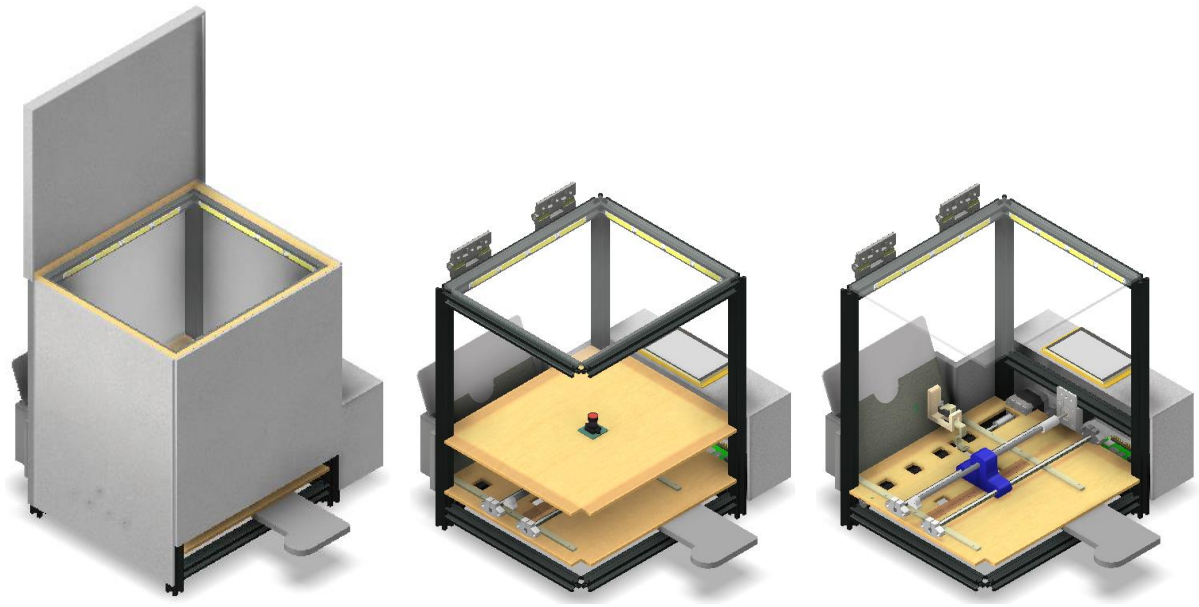
Figura 13. Diagrama de flujo del sistema de visión artificial.

3. Resultados

A manera de resumen en lo que respecta al diseño final, se realizó un renderizado del prototipo de escáner-copiadora de documentos braille, con la selección de elementos electrónicos, mecánicos y estructurales para su futura construcción, como se puede observar en la

Figura 14. Como resultado del trabajo desarrollado, se obtuvo un prototipo con masa estimada de 8.1 kg y dimensiones de 42 cm de alto, de 30 cm largo y 26 cm de ancho.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 16, pp. 212 - 230.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.



a) b) c)

Figura 14. Vistas del diseño final. a) Vista completa. b) Vista con piezas removidas para apreciar la región de escaneo. c) Vista con piezas removidas para observar el sistema mecánico.

Mediante el software de diseño asistido por computadora Autodesk Inventor se realizaron múltiples simulaciones para analizar el comportamiento y desempeño del mecanismo del actuador, y así verificar que el diseño y la selección de componentes son viables.

La primera simulación realizada fue un estudio de pandeo. En este análisis se determinan los esfuerzos, desplazamientos y el factor de seguridad de cada pieza al aplicar una carga sobre el ensamble.

En esta simulación el efector final aplicó sobre la hoja una fuerza de 1 N, pues se comprobó experimentalmente que esta fuerza es suficiente para marcar un punto. Debajo de la hoja se colocó la plancha de impresión, pieza encargada de sostener el papel durante el proceso de embosado. Se muestra el resultado de la simulación en la

Figura 15.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 16, pp. 212 - 230.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

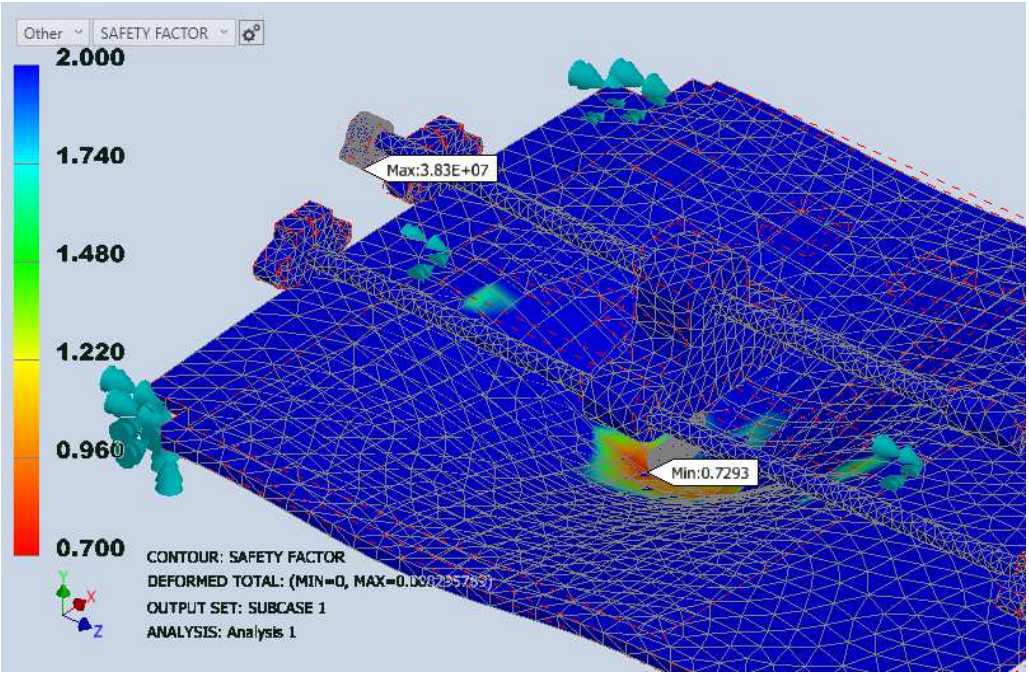


Figura 15. Resultados del análisis estático.

Se aprecia que el mecanismo y la plancha mantienen un factor de seguridad superior a 2 y con un máximo de $3.83x10^7$, mientras que en la hoja se obtiene un factor de seguridad inferior a la unidad, lo que garantiza el troquelado. Desde la vista inferior de la simulación se observa que el elemento que falla es únicamente la hoja y no el panel de impresión, como se muestra en la Figura 16.

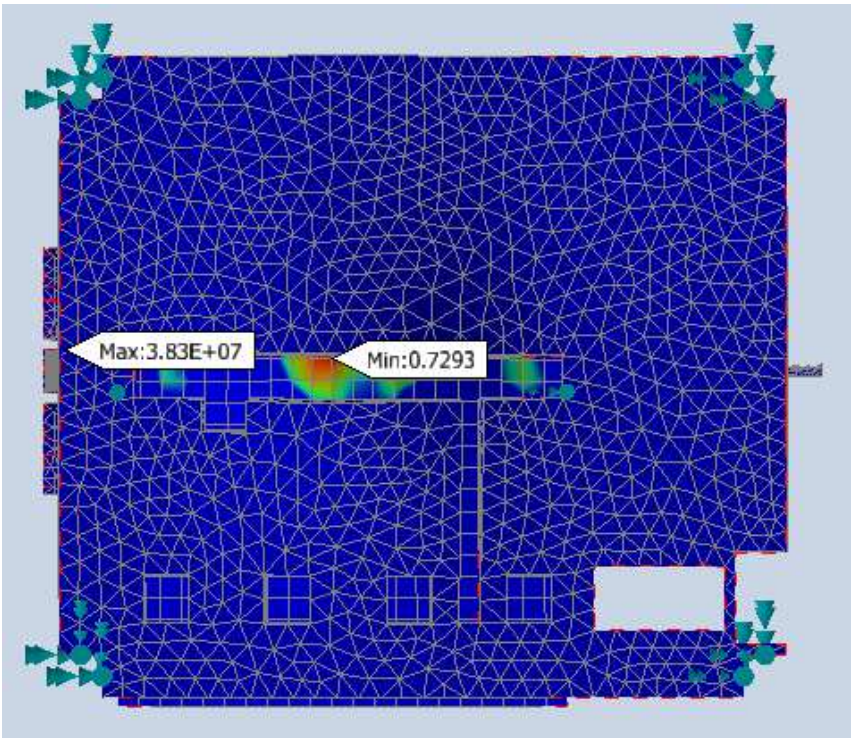


Figura 16. Vista inferior de la simulación de análisis estático.

A continuación, se realizó un análisis modal, para analizar las frecuencias de trabajo que producen un mayor esfuerzo sobre la máquina. El resultado se aprecia en la
Figura 17.

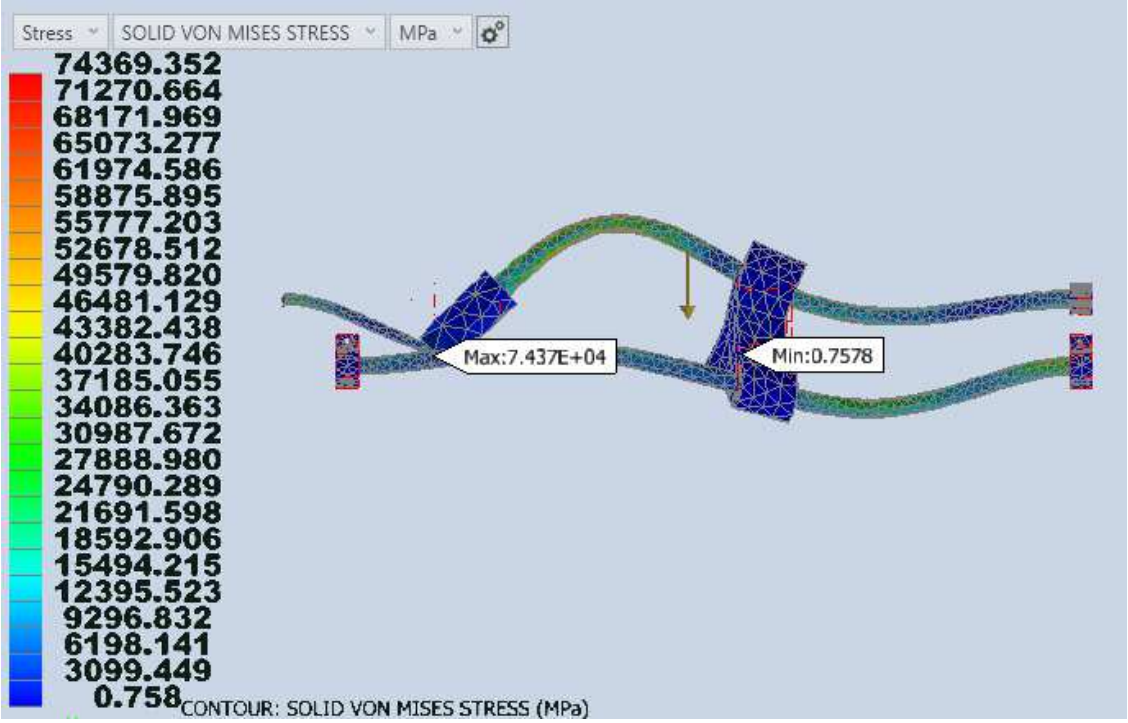


Figura 17. Análisis modal a una frecuencia de 1.03 kHz.

Las frecuencias en las que se obtiene un factor de seguridad inferior a la unidad, y por ende se debe evitar trabajar en ellas, son las mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3. Frecuencias obtenidas del análisis modal.

Modo	Frecuencia
1	194.803
2	226.515
3	303.631
4	334.669
5	412.552
6	791.523
7	863.354
8	870.214
9	893.013
10	1030.51

La simulación mostrada en la

Figura 18 se realizó para apreciar el pandeo en los ejes del actuador, para asegurarse de que este fenómeno no suceda en el mecanismo.

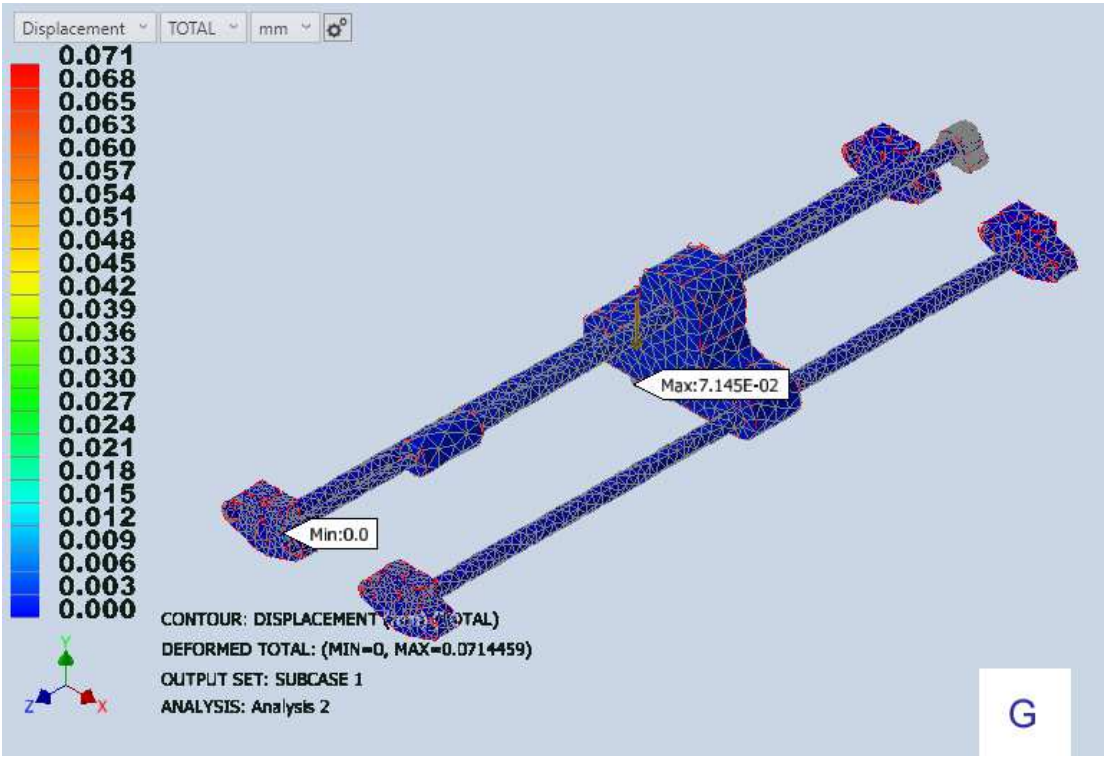


Figura 18. Resultados del análisis de pandeo.

Se aprecia una deformación máxima de 7.14 x10^{-2} mm, que se considera aceptable. Según los eigenvalores o valores propios obtenidos mediante la simulación, se requeriría una carga 88 veces superior para que el eje sufra de pandeo, por lo que el eje puede soportar tanto su propio peso como la carga.

Además, se hicieron pruebas y simulaciones para valorar técnicas de iluminación, siendo el objetivo principal que al escanear se produzcan sombras de los puntos braille para obtener su ubicación. Teniendo como resultado la Figura 19, donde se muestra que el uso de iluminación por campo oscuro es la mejor opción para propósitos del prototipo.

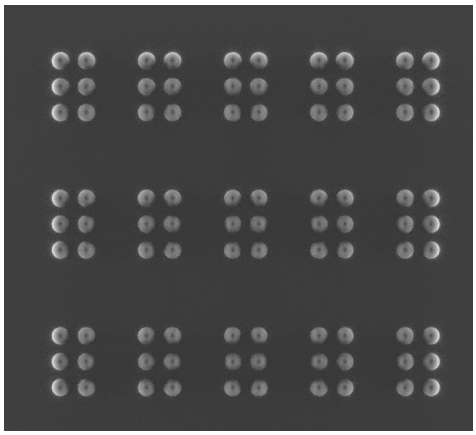


Figura 19. Prueba de iluminación por técnica de campo oscuro mediante trazado de rayos.

Respecto a la interfaz de usuario, para su desarrollo, se usó el lenguaje de programación de Python, con la herramienta principal de tkinter y customtkinter para el diseño visual, lograr la navegación entre menús y las acciones a tomar en el uso del prototipo, por ejemplo, en la Figura 20 se muestra el menú principal, en el que se puede seleccionar si se desea imprimir, escanear, obtener ayuda con una guía de usuario o salir. De la Figura 20 a la 24 se muestran las pantallas para las ventanas subsecuentes del menú principal.

Figura 20. Ventana principal del HMI.

Figura 21. Ventana de Guía de usuario.

Figura 22. Ventana de impresión, para seleccionar el archivo y el número de copias.

Figura 23. Ventana de escaneo.

Figura 24. Menú para guardar

4. Conclusiones

A partir del desarrollo respecto al planteamiento del problema, análisis de necesidades y métricas para cubrirlas, selección de diseño y haber profundizado en sus especificaciones mecánicas, de control, electrónicas, de visión artificial y de interacción para HMI, se diseñó un prototipo con base en la metodología de diseño mecatrónico que satisface los objetivos planteados, puesto que se realizó la planificación para que el escáner-copiadora sea capaz de tomar la imagen de un documento en braille por visión artificial, con un método de iluminación adecuado y consideraciones de diseño para capturar el documento en su totalidad, realizar el procesamiento debido y poder continuar a hacer el duplicado del documento mediante las operaciones electromecánicas detalladas para la impresión por relieve de los caracteres.

Se examinó detenidamente los elementos a seleccionar y manufacturar para conformar la estructura, mecanismos y electrónica que integran el prototipo, con las pruebas físicas necesarias, por ejemplo, para la elección de los micro servos lineales que ejecutaran el punzonamiento de los caracteres, se verificó que cumplen con la fuerza medida experimentalmente que se necesita para marcar una hoja con el gramaje para documentos braille. Por otro lado, también se revisó la funcionalidad del diseño con validaciones computacionales por medio de simulaciones de elemento finito.

Referencias

[1] A BRAILLE PRINTER ON REUSABLE THERMOPLASTIC SHEETS, (1999) 7803.
[2] M. Nadeem, N. Aziz, U. Sajjad, F. Aziz, H. Shaikh, A comparative analysis of Braille generation technologies, ICARM 2016 - 2016 Int. Conf. Adv. Robot. Mechatronics (2016) 294–299.

https://doi.org/10.1109/ICARM.2016.7606935.
[3] I. Duran Encinas, J.A. Sandoval Bringas, A.I. De Casso Verdugo, C. Sandoval Bringas, J.G. Soto Munoz, Low-Cost Braille Printer Prototype Design with OCR Technology, Proc. - 2019 Int. Conf. Incl. Technol. Educ. CONTIE 2019 (2019) 205–209. https://doi.org/10.1109/CONTIE49246.2019.00047.
[4] G. Di Bucchianico, Advances_in_Design_for_Inclusion_, 2016.
[5] S. Vasanthapriyan, M. De Silva, Optical braille recognition software prototype for the Sinhala language, Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. 4 (2019) 221–229. https://doi.org/10.25046/aj040427.
[6] S. Hara, R. Kawamitsu, K. Kusunoki, H. Sato, M. Fujiyoshi, Braille printing system, Lect. Notes Comput. Sci. (Including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics) 2398 (2002) 594–601. https://doi.org/10.1007/3-540-45491-8_116.
[7] M. Serpa Valdes, I. Rondon Rojas, Y. Gonzáles Cabrera, Consideraciones históricas sobre el sistema braille, Rev. Cuba. Oftalmol. 35 (2022) 1–11. https://revoftalmologia.sld.cu/index.php/oftalmologia/article/view/1145/pdf.
[8] R. Bin Yamin, H. Kusuma, Tasripan, Image processing-based braille document copying system as additional feature for ITS's braille printer, Procedia Comput. Sci. 197 (2021) 230–237. https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.136.
[9] J. Sarango Espinoza, W. Chamba Zaragocín, M. Espinoza León, Aprendizaje del sistema de lectura y escritura Braille basado en las TIC, Cedamaz 12 (2022) 77–84. https://doi.org/10.54753/cedamaz.v12i1.1268.
[10] E.C. Ramírez, PRÁCTICAS INCLUSIVAS Y ESTRÉS LABORAL EN EL PROFESORADO. CASO PRIMARIA "LIC. BENITO JUÁREZ", EN JEREZ, ZACATECAS, 2020-2022, 2022.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 17, pp. 231 - 245.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Construcción y Control de Posición de un Robot Móvil Autónomo con ESP32

Loranca Gómez Sofia, Michua Camarillo Antonio, Bonilla Barranco Héctor, García Sánchez Enrique Rafael, Fierro Rojas Jorge Dionisio y Barrales Romero Missael

Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Av. San Claudio y 18 sur, San Manuel, Puebla 72570, Pue., México.
sofia.lorancag@alumno.buap.mx

Resumen

En este trabajo se presenta la construcción y control de un robot móvil diferencial de dos ruedas, se muestran los materiales utilizados en la construcción del robot cuyo microcontrolador elegido es el ESP32 el cual cuenta con conexión wifi y bluetooth. Se caracterizan los motores utilizados y se obtiene un modelo de primer orden. Para obtener el modelo del robot se utilizan las ecuaciones cinemáticas para un punto desplazado. El control aplicado es de posición y se analiza la estabilidad del sistema por el método de Lyapunov para dos controladores, un controlador proporcional y un control saturado. Los resultados obtenidos permiten prever el comportamiento del vehículo autónomo para diferentes puntos.

Palabras clave: Control, robot móvil, autónomo.

1. Introducción

El desarrollo de robots móviles autónomos ha experimentado un notable crecimiento en las últimas décadas, impulsado por avances tecnológicos en áreas como el control de sistemas, la electrónica y la robótica. Este proyecto se enfoca en la construcción y control de un robot móvil diferencial de dos ruedas, utilizando como base el microcontrolador ESP32, el cual ofrece capacidades de comunicación mediante WiFi y Bluetooth. El diseño del robot incluye motores con encoders magnéticos, que permiten obtener una retroalimentación precisa de la velocidad y posición del vehículo, lo que es fundamental para implementar un control efectivo basado en algoritmos de control clásico, como el proporcional-derivativo-integral (PID) y un control basado en la estabilidad de Lyapunov [1].

El estado del arte en robots móviles autónomos involucra diversas técnicas de control y modelado cinemático, como las descritas en este proyecto, donde se utilizan ecuaciones cinemáticas para derivar un modelo matemático que describe el movimiento del robot [2]. Este enfoque, junto con la caracterización de los motores y el uso de técnicas de filtrado de señales para mejorar la precisión de los encoders, garantiza un desempeño estable y preciso del sistema [3].

El uso del ESP32 como cerebro del robot no solo facilita la integración de algoritmos de control, sino que también permite la comunicación inalámbrica, lo que es crucial para aplicaciones de robótica en tiempo real y control remoto [5]. Este proyecto refleja el estado actual de los avances en robótica móvil y sienta las bases para futuras mejoras en la precisión y eficiencia del control autónomo.

2. Descripción del robot móvil

El robot móvil es un sistema electromecánico, el cual se mueve en el plano de forma autónoma.

Para lograr partir de un punto a otro en el plano se cuenta con dos sensores de tipo enconder, los cuales suministran información acerca de la distancia recorrida. La configuración del robot móvil es de tipo diferencial. Para la construcción del robot móvil se utiliza un chasis de acrílico con motorreductores N20 de la marca pololu. El chasis cuenta con una rueda de metal libre en la parte posterior y dos ruedas de goma en la parte frontal, todos estos elementos conforman la base.

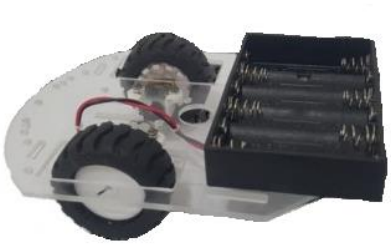


Figura 1. Base de robot móvil con motores pololu.

Los motorreductores que se utilizan tienen una velocidad de 350 rpm cuando se aplica un voltaje de 6V y cuentan con enconder de tipo magnético con una resolución de 203 pulsos por revolución, los cuales se muestran en la figura 2.

Figura 2. Motorreductores con encoder magnético

El dispositivo para manejar la potencia de los motores es el TB6612FNG en cual puede suministrar una corriente máxima de 1.2 amperes y cuyo voltaje de motor se encuentra en el intervalo de 2.2v a 13.5v. En la figura 3 se muestra el dispositivo.

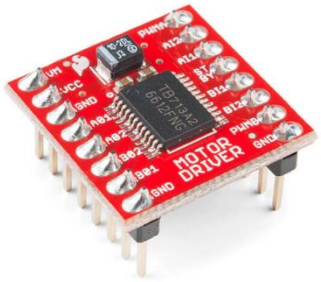


Figura 3. Driver TB6612FNG

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 17, pp. 231 - 245.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

El dispositivo que controla todo el robot móvil es el ESP32 de la empresa Expressif. Se ha utilizado el modelo de 30 pines para el control del robot.

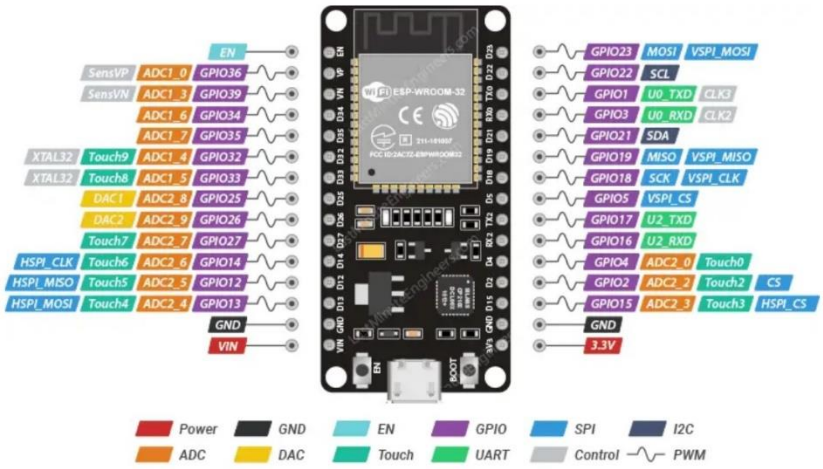
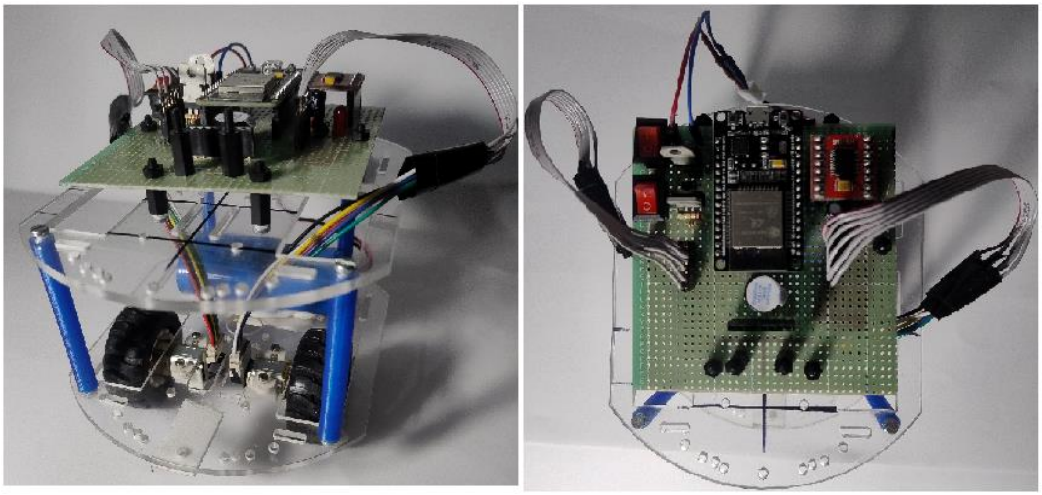


Figura 4. Microcontrolador ESP32 de 30 pines

La construcción se realiza colocando en la base un chasis mostrado en la figura 1 y se colocan cuatro soportes que sirven como base para otro chasis montado en la parte superior. En la parte inferior se montan los motores y una batería para la alimentación que suministra 7.4 Volts a 1800 mA, en la parte superior se fija la electrónica para el control del robot. La figura 4 muestra el prototipo armado.



a) b)

Figura 4. a) Robot móvil diferencial b) Vista superior

2.1 Diagrama eléctrico

El diagrama eléctrico se muestra en la figura 5. En este diagrama podemos observar las conexiones de los motores al circuito de potencia y también los pines de control.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 17, pp. 231 - 245.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

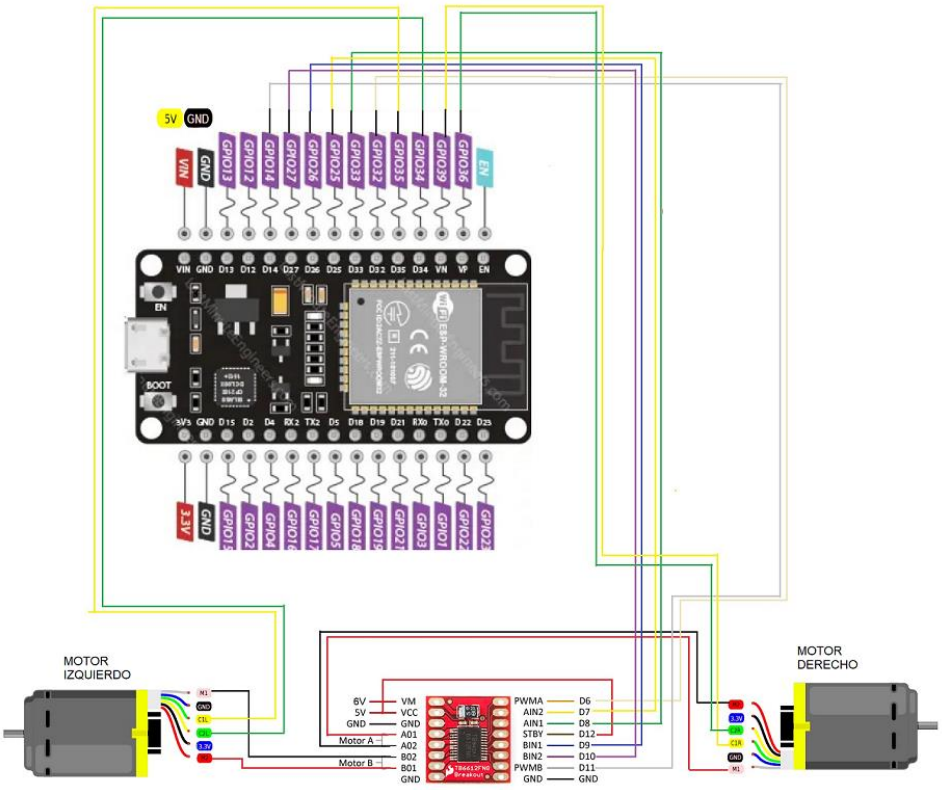


Figura 5. Diagrama eléctrico

Se conecto también un divisor de voltaje que va desde la batería a el pin 15 que representa el pin análogo cero del ESP32 y sirve para sensar si la batería se encuentra en un nivel bajo de voltaje. Además, se conecta un buzzer en pin 4 para tener una indicación sonora.

3. Caracterización de los motores de corriente directa

Para realizar el control del robot móvil de caracterizan los motores aplicando una señal escalón del 35% del voltaje máximo de funcionamiento. La respuesta obtenida se muestra en la figura 6.

Se aprecia que la repuesta del sistema **R** para una entrada **u** se encuentra retrasada con respecto del escalón. El modelo de primer orden se obtiene a partir de toolbox de identificación de sistemas (“ident”) de Matlab el cual nos estima la función de transferencia con un 97% de precisión.

$$G(s) = \frac{K}{1 + T_p s} e^{-T_d s} \tag{1}$$

Donde el valor de K=0.94, Tp=0.056 y Td=0.037. Con este modelo se realiza un controlador PID (proporcional integral derivativo) para controlar la velocidad de cada motor y compensar los efectos dinámicos del robot. Para encontrar las ganancias del controlador se utiliza el toolbox de Matlab para la sintonía de control PID (pidTuner).

Las ganancias que se obtienen de Matlab para el controlador son para la ganancia proporcional Kp=0.178, ganancia integral Ki = 6.3 y ganancia derivativa Kd = 0.00126, el modelo se muestra en la

ecuación 2, este control se debe de pasar al espacio discreto con un tiempo de muestreo de Ts = 0.1 segundo.

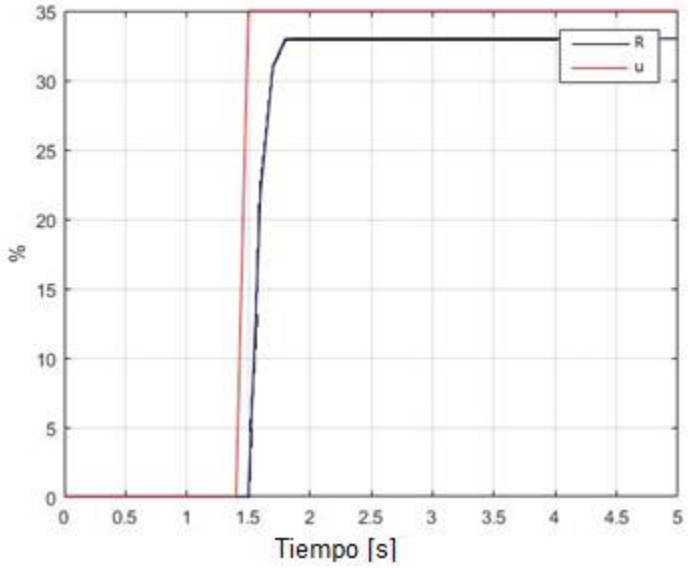


Figura 6. Respuesta al escalón de motor pololu N20

$$u = K_p e + K_i \frac{1}{s} e + K_d e \tag{2}$$

$$\frac{u}{e} = K_p + K_i \frac{T_s(z+1)}{2(z-1)} + K_d \frac{2(z-1)}{T_s(z+1)} \tag{3}$$

A partir de la ecuación 3 del espacio en tiempo discreto el controlador se pasa a la forma de sumas y restas para poder implementarlo en el microcontrolador ESP32. Se debe tomar en cuenta que las ganancias que calcula Matlab se deben modificar para sintonizar el controlador lo mejor posible.

4. Modelo del robot móvil y control

El modelo cinemático del robot móvil se obtiene a partir de la suposición que tenemos la condición de rodadura, en la cual las ruedas no deslizan y se encuentran en una superficie plana. Para estas condiciones se elige un sistema de referencia mostrada en la figura 7. En la figura se estudia el punto de control que se encuentra indicado como punto 2, el cual es un punto desplazado del centro de las dos ruedas, esto asegura que existe la matriz Jacobiana. Las velocidades del robot en el punto 1 son:

$$\dot{x}_1 = v cos\emptyset \tag{4}$$
$$\dot{y}_1 = v sen\emptyset \tag{5}$$

Donde la posición del punto 2 en la figura 7 se calcula de la siguiente forma:

$$P_{2x} = x_1 + d cos\emptyset \tag{5}$$
$$P_{2y} = y_1 + d sen\emptyset \tag{6}$$

La derivada de Px y Py con respecto al tiempo se expresa en la siguiente ecuación:

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 17, pp. 231 - 245.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

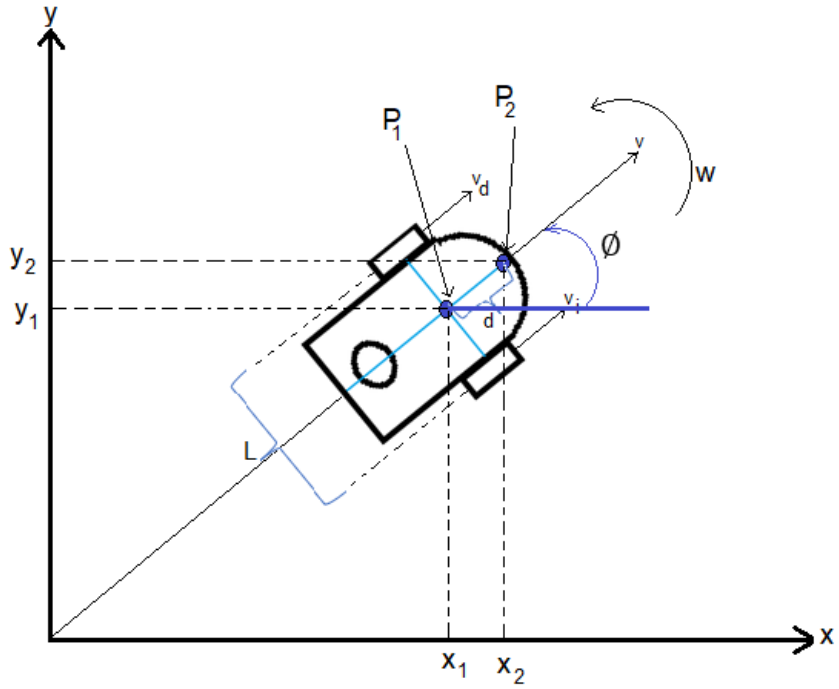


Figura 7. Sistema de referencia para robot móvil

$$\dot{P}_{2x} = vcos\emptyset - dwsen\emptyset \quad (7)$$

$$\dot{P}_{2y} = vsen\emptyset + dwcos\emptyset \quad (8)$$

En el sistema de ecuaciones 7 y 8, v es la velocidad lineal, la letra *w* representa la velocidad angular del robot, la cual es la derivada de la posición angular Ø con respecto del tiempo, d es la distancia del punto 1 al punto 2. En forma matricial se puede escribir de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} \dot{P}_{2x} \\ \dot{P}_{2y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} cos\emptyset & -dsen\emptyset \\ sen\emptyset & dcos\emptyset \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ w \end{pmatrix} \quad (9)$$

Las ecuaciones de movimiento se pueden expresar en forma vectorial:

$$\dot{\boldsymbol{P}} = \boldsymbol{J}\dot{\boldsymbol{q}} \quad (10)$$

Donde ***J*** representa el jacobiano del sistema. La ecuación 10 representa el modelo del sistema. También se muestran las relaciones de las velocidades globales con respecto a las velocidades de cada rueda.

$$w = \frac{1}{L}(v_d - v_i) \quad (11)$$

$$v = \frac{1}{2}(v_d + v_i) \quad (12)$$

Así como las ecuaciones de las velocidades de cada rueda en términos de las velocidades globales.

$$v_d = v + \frac{wL}{2} \quad (13)$$

$$v_i = v - \frac{wL}{2} \quad (14)$$

Donde la relación de las velocidades lineales con las velocidades angulares se describe como:

$$v_d = Rw_d \quad (15)$$
$$v_i = Rw_i \quad (16)$$

donde R representa el radio de la rueda.

4.1 Control del robot móvil

El control del robot móvil autónomo se realiza mediante la teoría de Lyapunov, donde el controlador suministra la energía necesaria para llegar al punto deseado. A continuación, se muestra el diagrama de bloques del sistema de control.

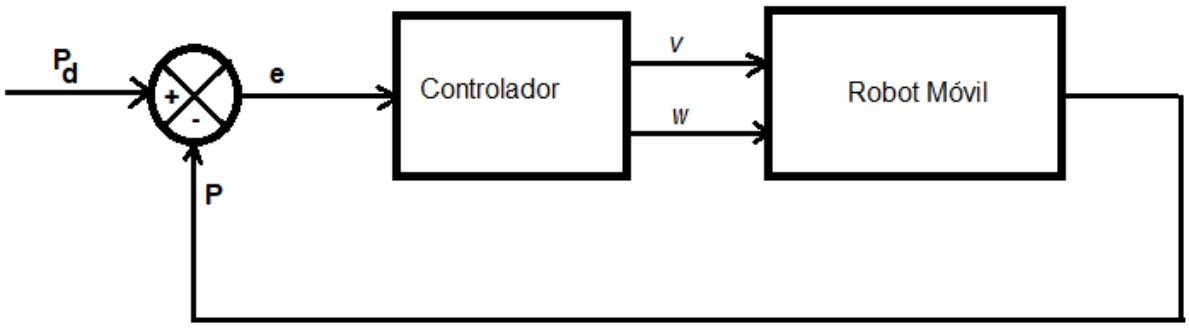


Figura 8. Diagrama de control

Como se muestra en la figura 8 se calcula el errar de las posiciones y lo que se envía son las velocidades lineal *v* y angular *w* al robot móvil el programa convierte estos valores a velocidades en cada rueda, una vez que se aplican estas velocidades el controlador calcula la posición actual y se compara con la posición deseada para obtener el error y obtiene una nueva acción de control para llegar al punto deseado.

4.2 Control del robot móvil

Para realizar el controlador propuesto se utiliza la teoría de control en el sentido Lyapunov. Esta teoría dice que se debe elegir una función **V**(x) definida positiva que debe cumplir [3]:

1) $\boldsymbol{V}(\boldsymbol{x})\ 0$
2) $\dot{\boldsymbol{V}}(x) \leq 0 \quad \forall\, t \geq 0$

Si las condiciones se cumplen entonces el sistema es estable. De acuerdo con el modelo del robot de la ecuación 8 se puede reescribir de la siguiente forma

$$\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{J}^{-1}\dot{\boldsymbol{P}} \quad (17)$$

Donde se tiene el vector de velocidades globales que depende del vector de posición, a esta expresión se le llama la cinemática diferencial inversa. Para esta ecuación se propone la función candidata de Lyapunov.

$$\boldsymbol{V}(x) = \frac{1}{2}\boldsymbol{e}^T\boldsymbol{e} \quad (18)$$

Cuya derivada es

$$\dot{\boldsymbol{V}}(x) = \boldsymbol{e}^T \dot{\boldsymbol{e}} \tag{19}$$

Donde ***e*** representa el vector de error de posición definido como

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{P}_d - \boldsymbol{P} \tag{20}$$

Para cumplir la segunda condición de Lyapunov se elige la derivada del error de la siguiente forma

$$\dot{\boldsymbol{e}} = -\boldsymbol{G}\boldsymbol{e} \tag{21}$$

Lo que nos lleva a tener la derivada de la función candidata como

$$\dot{\boldsymbol{V}}(x) = -\boldsymbol{e}^T \boldsymbol{G}\boldsymbol{e} \tag{22}$$

La matriz ***G*** se elige definida positiva y es una matriz cuadrada de ganancias diferentes de cero en la diagonal, con esta elección la derivada es definida negativa y cuando el error tiende a cero el sistema es estable. La derivada del vector de posición ***P*** se puede despejar de la ecuación 20 y se obtiene:

$$\dot{\boldsymbol{P}} = -\dot{\boldsymbol{e}} \tag{23}$$

En esta ecuación la derivada del punto deseado en cero debido a que en control de posición su valor es constante. Al sustituir el valor de la ecuación 23 en 19 se tiene la forma del control:

$$\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{J}^{-1}\boldsymbol{G}\boldsymbol{e} \tag{24}$$

La ecuación 24 representa un control proporcional y para la implementación del control se proponen la matriz de ganancias de dimensión dos de ***G*** y el vector de error ***e*** de una columna por dos filas, ambos se calculan en cada tiempo de muestreo. También se propone que la derivada del error sea una función saturada de la forma

$$\dot{\boldsymbol{e}} = -\boldsymbol{G}\boldsymbol{tanh}(\boldsymbol{e}) \tag{25}$$

Siguiendo el mismo procedimiento de las ecuaciones 21 a la 24 se obtiene el siguiente controlador

$$\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{J}^{-1}\boldsymbol{G}\boldsymbol{tanh}(\boldsymbol{e}) \tag{26}$$

Esta última expresión representa un control saturado debido al comportamiento de la función tanh que se muestra en la figura 9. Estas funciones son estudiadas en otro tipo de robots como los vistos en [2],[3].

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 17, pp. 231 - 245.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

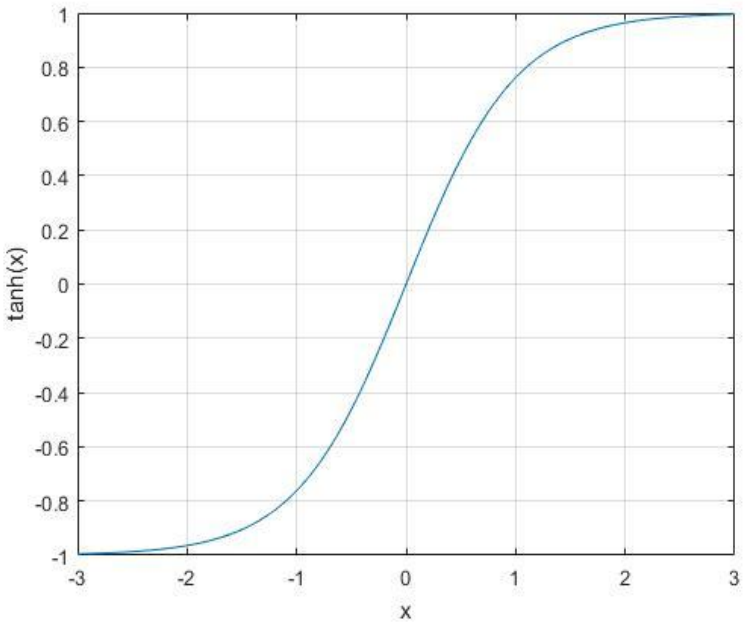


Figura 9. Función tanh(x)

Al igual que en el control proporcional este también es estable, para valores negativos del error la función tanh los mantiene en el intervalo de [0,1] en el eje de la variable dependiente, de la misma forma para valores negativos del error se mantiene el error en el intervalo de [-1,0]. Este comportamiento es deseable cuando se quiere mantener un rango de control que no sobrepase la salida máxima controlada.

5. Resultados

El algoritmo de control se implementó en Matlab versión 2020 y la computadora se comunica a través de la transmisión bluetooth del microcontrolador ESP32 para recibir los datos de velocidades medidas en el robot, este calcula el error, obtiene el siguiente valor de control y envía las velocidades que debe seguir el robot cada periodo de muestreo de 0.1 segundos.

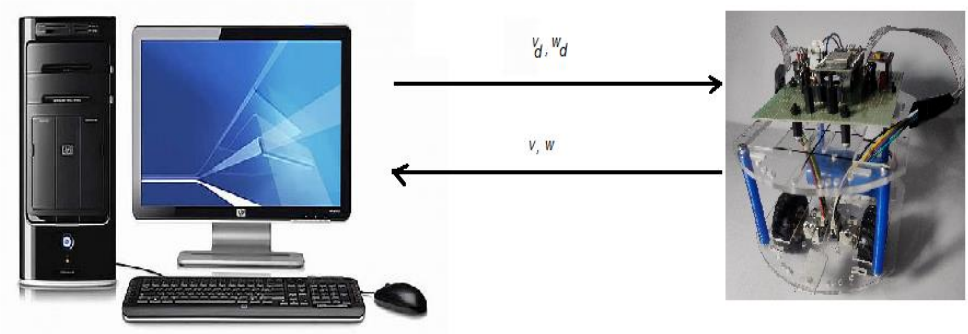


Figura 10. Esquema de comunicación PC y robot

5.1 Parámetros.

La tabla que se muestra a continuación los valores de las variables del robot móvil las cuales se utilizan para el cálculo de velocidades y distancia recorrida.

Tabla 1. Muestra de una tabla.

Parámetro	Valor
Longitud entre ruedas L	0.073m
Distancia del centro de las ruedas al punto de control d	0.06m
Radio de las ruedas R	0.022m

Las gráficas para un punto programado en [0.5,0] en la que se aplica el controlador de la ecuación 24 se muestran en las figuras 11 al 13.

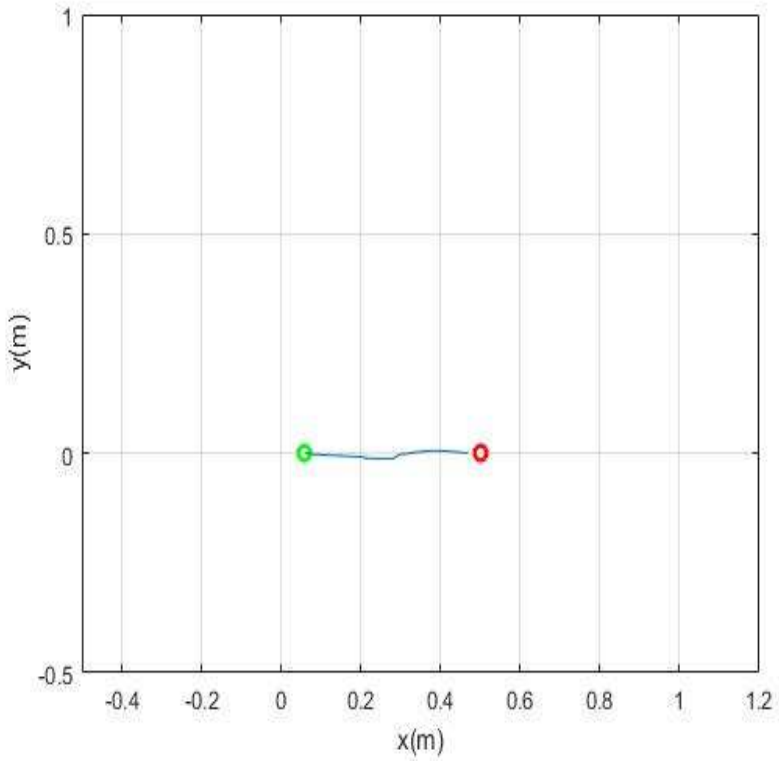


Figura 11. Grafica del control de posición para el punto [0.5,0]

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 17, pp. 231 - 245.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

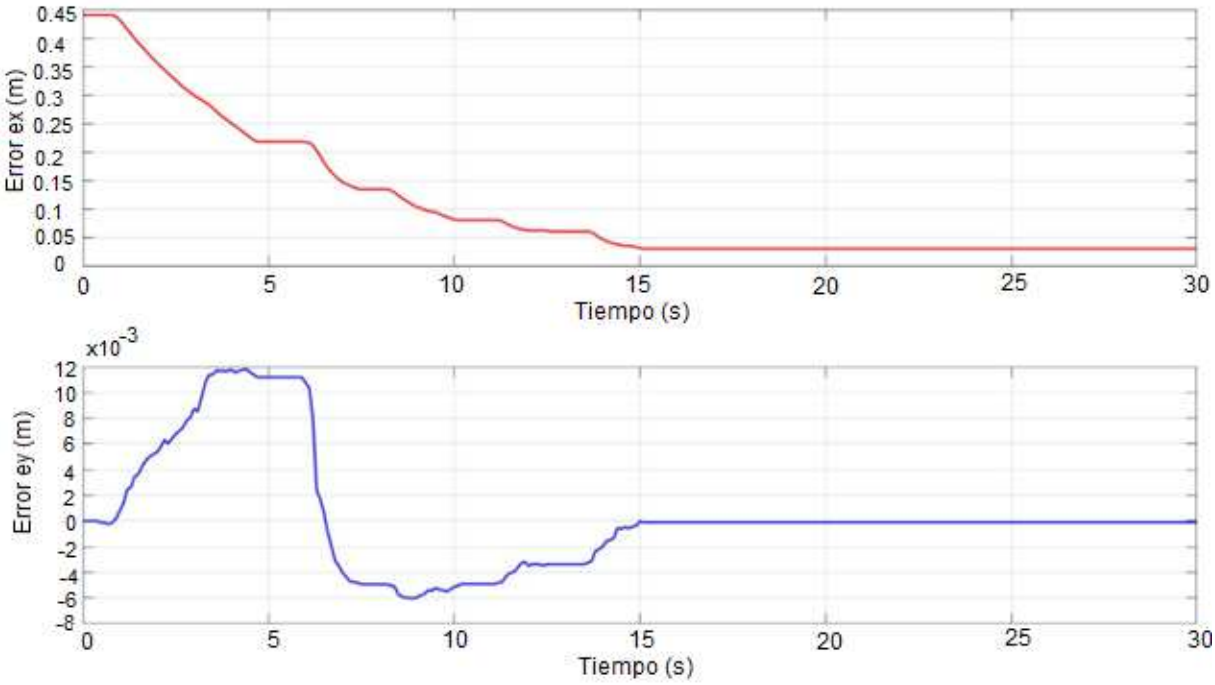


Figura 12. Grafica de errores de posición para el punto [0.5,0]

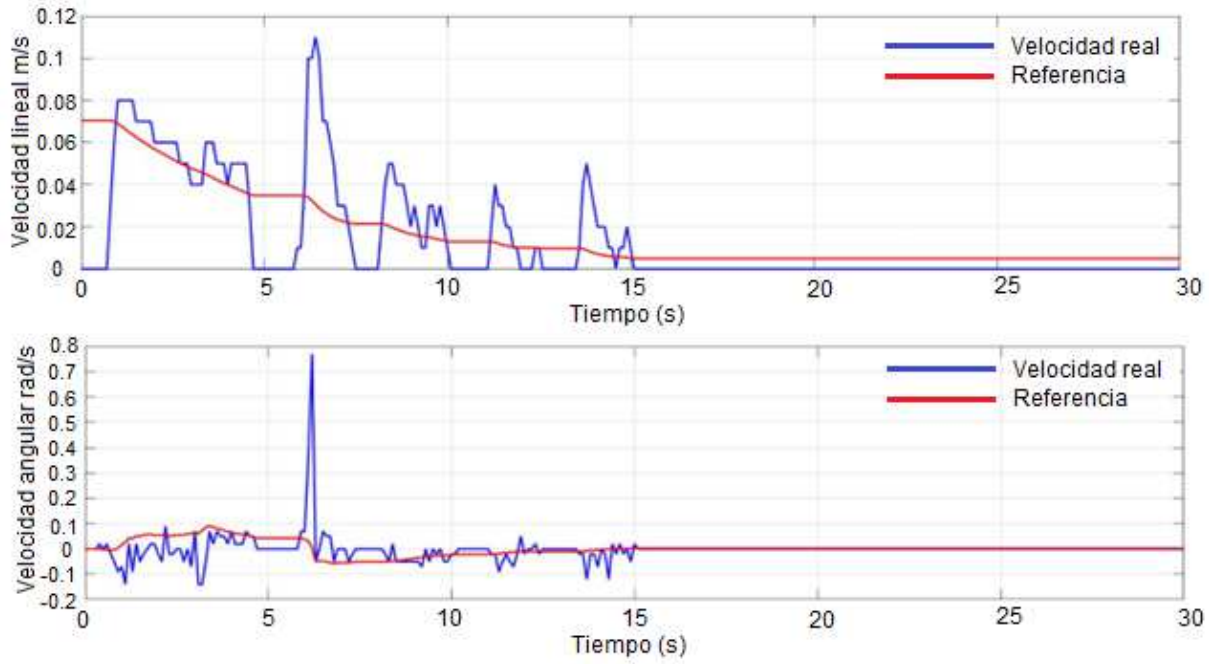


Figura 13. Grafica de las variables de control de referencia y su medida real en [0.5,0]

Como se observa en las figuras anteriores para un punto sobre el eje el robot empieza a trasladarse al punto deseado sin embargo llega a un valor cercano, en este caso las ganancias se eligen como:

$$\boldsymbol{G} = \begin{pmatrix} 0.16 & 0 \\ 0 & 0.16 \end{pmatrix}$$

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 17, pp. 231 - 245.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Para un punto en el plano x, y se tiene el valor deseado en [0.5,0.5] se obtienen los siguientes resultados.

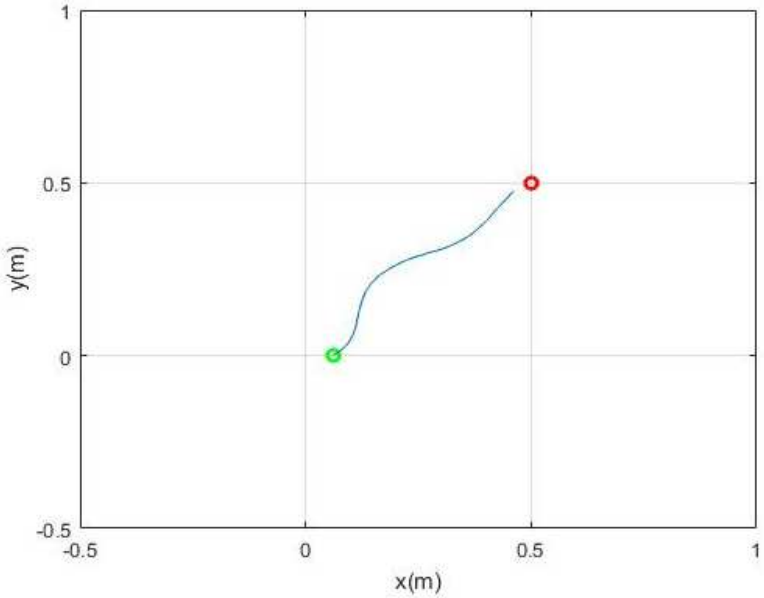


Figura 14. Grafica de control de posición para el punto [0.5,0]

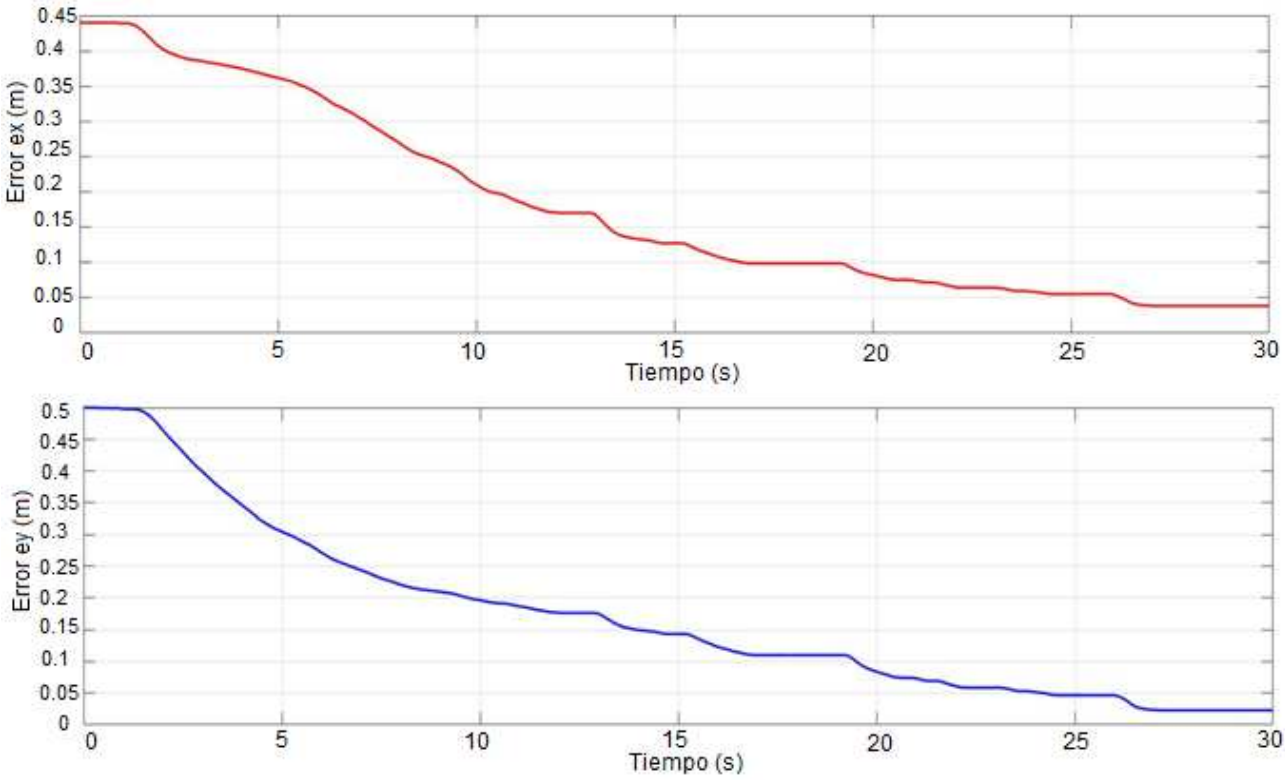


Figura 15. Grafica de errores de posición para el punto [0.5,0.5]

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 17, pp. 231 - 245.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

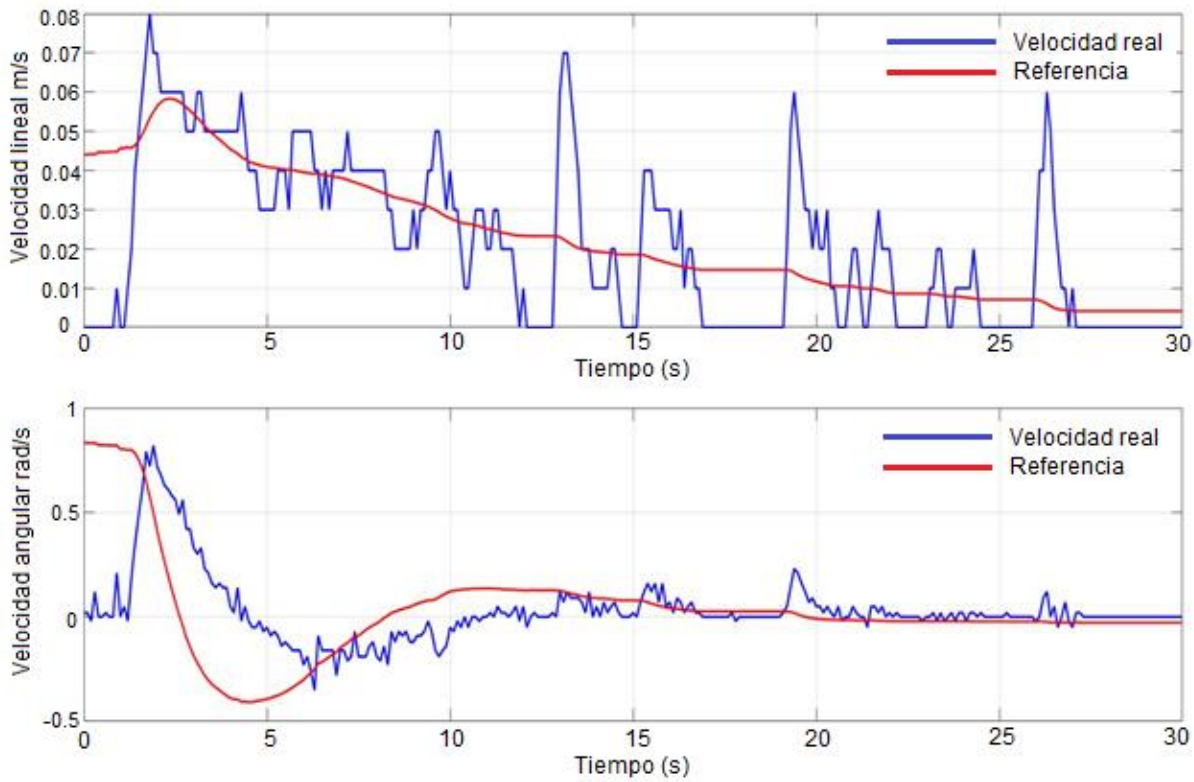


Figura 16. Grafica de las variables de control de referencia y su medida real en [0.5,0.5]

Para este caso las ganancias elegidas son de menor valor debido a que al aumentarlo el móvil experimenta oscilaciones.

$$\boldsymbol{G} = \begin{pmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{pmatrix}$$

En esta última parte se muestran los resultados obtenidos por la función de control saturada

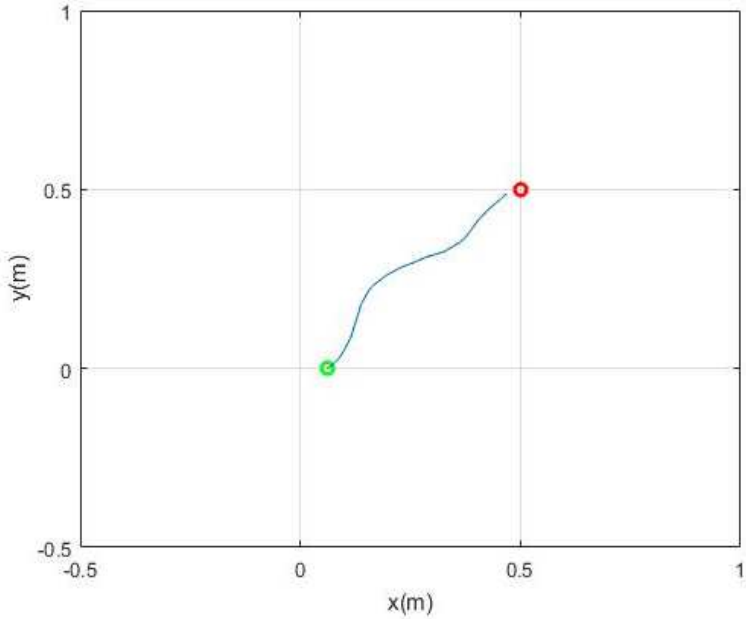


Figura 17. Grafica de control de posición tanh para el punto [0.5,0.5]

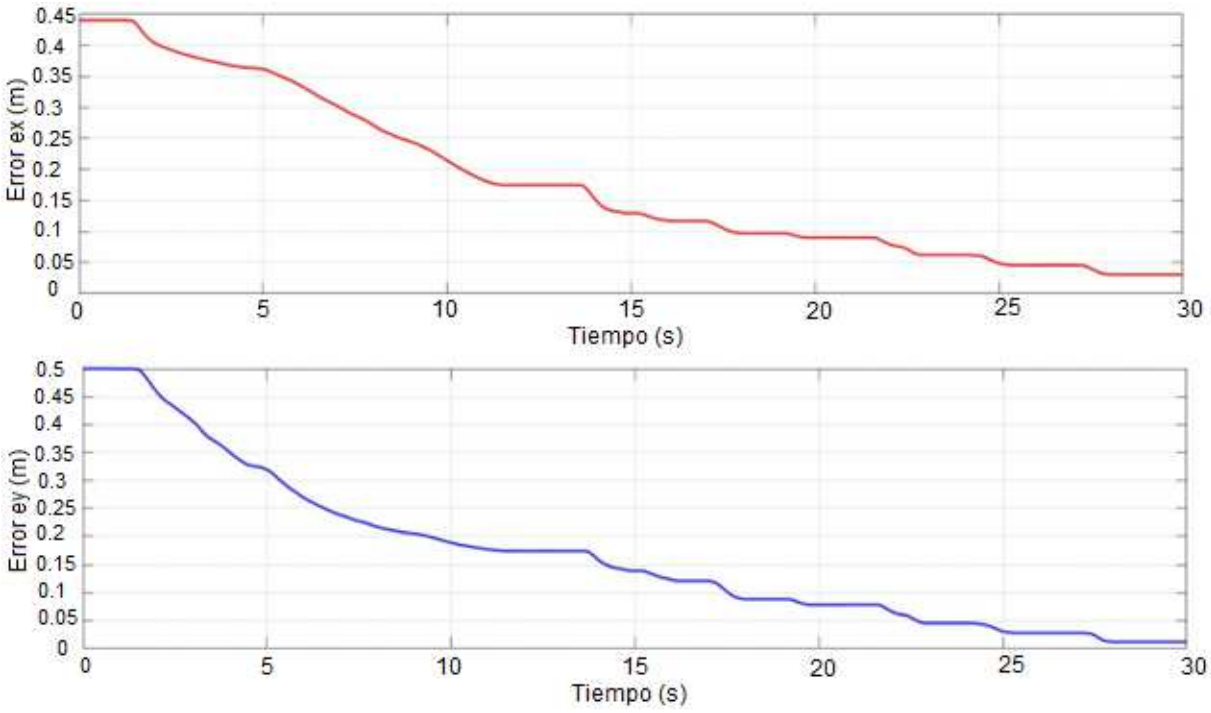


Figura 18. Grafica de errores de posición tanh para el punto [0.5,0.5]

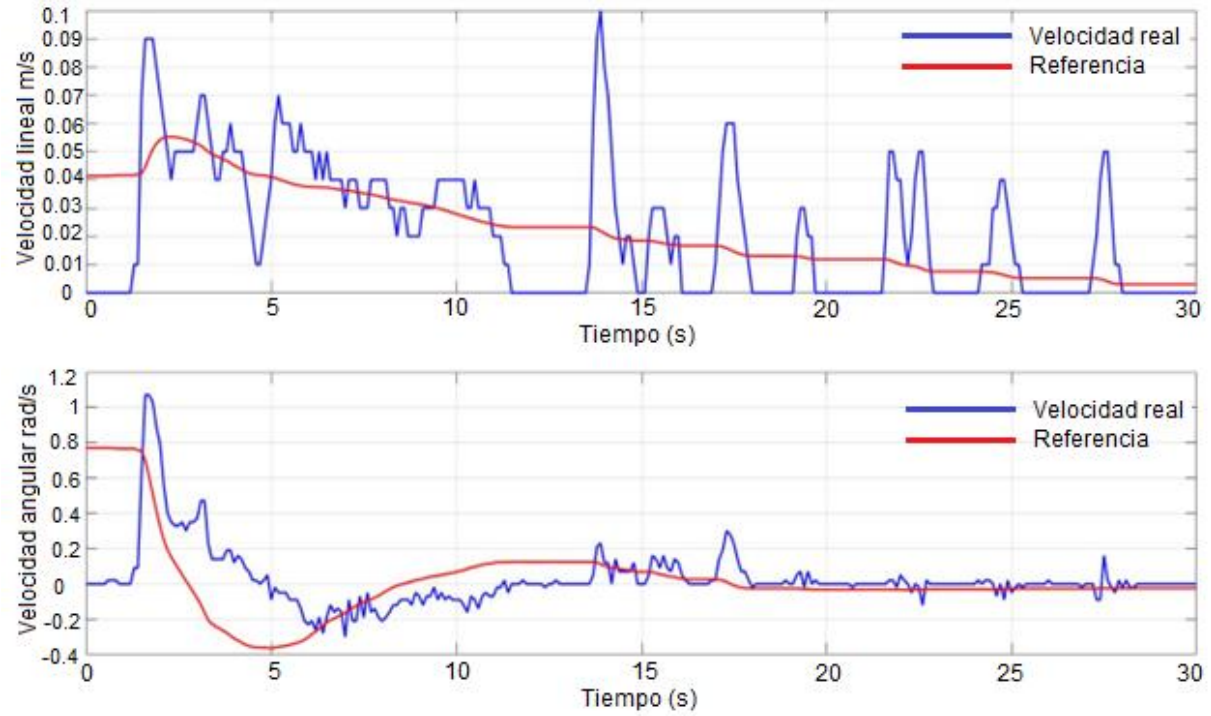


Figura 19. Grafica de las variables de control para tanh de referencia y su medida real en [0.5,0.5]

En el caso del controlador saturado las guanacias utilizadas para el punto [0.5,0.5] tienen la misma estructura de la matriz ***G*** a la propuesta para el control proporcional de valor 0.1 en la diagonal.

6. Conclusiones

En este trabajo se muestra la construcción y control de un robot móvil tipo diferencial para el cual se han probado dos controladores basados en la teoría de Lyapunov. El comportamiento del control saturado es similar al proporcional para esta estructura de control, la ventaja de este enfoque es limitar el error de posición. Las velocidades lineal y angular de referencia del robot son seguidas por el robot, pero existen perturbaciones físicas que provocan que el robot se desvié de los valores de referencia, este comportamiento se observa en ambos controladores. Los errores en los ejes x, y van convergiendo a cero sin embargo llegan a un intervalo cercano al punto deseado cuando termina el tiempo de simulación.

Este prototipo sirve como una plataforma para probar distintos algoritmos de control y se seguirán probando nuevos algoritmos que disminuyan el error de posición y también en el área de la visión artificial.

Referencias

[1] Tzafesta S, “Introduction to Mobile Robot Control”, Elsevier, London, First edition, 2014.
[2] Reyes F. “Robótica. Control de robots manipuladores ”, Alfaomega, México, Primera edición, 2011.
[3] Kelly R, Santibáñez V. “Control de movimiento de robots manipuladores”, Pearson Education, España, Primera edición, 2003.
[4] Ogata K. “Ingeniería de control moderna”, Pearson Educación, S.A, Madrid, 5ª edición, 2010.
[5] Miranda R. “Cinemática y dinámica de robots manipuladores”, Alfaomega, México, Primera edición, 2016.
[6] Ogata K. *“Ingeniería de control moderna”*, *Pearson Educación, S.A*, Madrid, 5a edición, 2010.
[7] Alfaro V. *“Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores”*, Ingeniería 12 (1,2): 21-36, San José, Costa Rica, 2002.
[8] Guagchinga F, Calvopiña P, Alpúsig S, Cajas M. *“Control PID de procesos autoregulados e integrantes sintonizados con el método lambda”*, *Perspectivas*, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Volumen 3, N°1, 43-49, 2021.
[9] Barsanti R. *“Teaching PID Controller Design Using Matlab*”, ASEE Southeast Section Conference, American Society for Engineering Education, The Citadel, United States, 2022.
[10] Pruna E, Sasig E, Mullo S. *“PI and PID controller tuning tool based on the lambda method”*, CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), IEEE, Chile, 2017.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 18, pp. 246 - 264.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Perceptrón Multicapa para el Seguimiento Colaborativo de Trayectorias de ROV en una Formación Líder-Seguidor con Comunicación no Efectiva

Pérez Alvarado Milton Eduardo (✉), Gómez Espinosa Alfonso, González García Josué, García Valdovinos Luis Govinda y Salgado Jiménez Tomás

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial
m.perez@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen

Actualmente, enfrentamos un desafío considerable en las operaciones colaborativas que involucran la comunicación entre ROVs (Vehículos Operados Remotamente), especialmente bajo un esquema de líder-seguidor. Este reto se debe principalmente a las limitaciones de los módems acústicos, que experimentan latencias significativas en la transmisión de datos sobre posición y velocidad, influenciadas por las condiciones del medio acuático, como las corrientes marinas. Para abordar este problema, se han evaluado enfoques tradicionales como los predictores recursivos de mínimos cuadrados y el filtro de Kalman. No obstante, estos métodos presentan limitaciones cuando se enfrentan a variaciones no lineales en las corrientes. Como alternativa, se han explorado predictores más avanzados, como las redes neuronales de perceptrón multicapa (MLP), que han sido poco estudiadas en el contexto de tareas colaborativas, especialmente en presencia de perturbaciones no lineales y retrasos en la señal. Las simulaciones indicaron que el uso de predictores como LS, MLP y Kalman mejora el rendimiento respecto a no emplear ningún predictor, con un incremento del 2.9%, 2.6% y 2.6%, respectivamente. Estos resultados sugieren que el MLP es particularmente efectivo para mejorar el desempeño en escenarios complejos, como los que emulan las condiciones del mar y la comunicación entre vehículos.

Palabras clave: ROVs colaborativos; Latencia de comunicaciones y sensores; MLP

Abstract

Currently, we face a considerable challenge in collaborative operations involving communication between ROVs (Remotely Operated Vehicles), especially under a leader-follower scheme. This challenge is mainly due to the limitations of acoustic modems, which experience significant latencies in the transmission of position and velocity data, influenced by the conditions of the aquatic environment, such as sea currents. To address this problem, traditional approaches such as recursive least squares predictors and Kalman filtering have been evaluated. However, these methods have limitations when faced with nonlinear variations in currents. Alternatively, more advanced predictors such as multilayer perceptron (MLP) neural networks have been explored. Still, they have been studied little in the context of collaborative tasks, especially in the presence of nonlinear perturbations and signal delays. Simulations indicated that using predictors such as LS, MLP, and Kalman improves performance over employing no predictors, with an increase of 2.9%, 2.6%, and 2.6%, respectively. These results suggest that MLP is particularly effective in improving performance in complex scenarios, such as those emulating sea conditions and vehicle-to-vehicle communication.

Keywords: Collaborative ROVs; Communication and Sensor Latency; MLP; RNN.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 18, pp. 246 - 264.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

1. Introducción

La colaboración entre vehículos operados remotamente (ROV) en entornos submarinos ofrece una serie de ventajas significativas. Permite realizar varias tareas de manera simultánea, en lugar de depender de un solo vehículo, lo que incrementa considerablemente la eficiencia operativa y expande la capacidad total de carga. La coordinación entre varios ROV no solo extiende el área de cobertura para la inspección de entornos marinos, sino que también reduce costos y mejora la capacidad de adaptación a los cambios, haciendo las operaciones más flexibles y eficientes. Además, contar con múltiples vehículos proporciona una redundancia que mejora la fiabilidad operativa, ofreciendo alternativas en caso de que alguno de los vehículos falle.

Como resultado las ventajas operativas mencionadas, se experimenta una reducción significativa en los costos operativos y una notable mejora en la velocidad y eficiencia de las operaciones submarinas. Esta eficiencia mejorada no solo permite realizar tareas de manera más rápida, sino que también optimiza el uso de recursos, lo que es crucial en entornos desafiantes como el submarino. Actualmente, se dispone de una amplia gama de tareas colaborativas que hacen uso de diversos sistemas de control avanzados. Entre estos, destacan aquellos que enfrentan y resuelven los desafíos relacionados con el control no lineal, un aspecto crítico en el control ROVs.

Debido a la naturaleza compleja y no lineal en la dinámica del robot contando con seis grados de libertad en el sistema plantea retos significativos. La interacción simultánea de movimientos en diferentes ejes y la necesidad de mantener estabilidad en condiciones cambiantes requieren soluciones de control avanzadas. Por ello, se han desarrollado enfoques innovadores y sofisticados que buscan superar las limitaciones inherentes al control de sistemas no lineales. Estos enfoques incluyen el uso de algoritmos de control predictivo, técnicas de aprendizaje automático y estrategias de control adaptativo, todos diseñados para mejorar la precisión y estabilidad de los ROVs en un entorno tan dinámico y hostil como el marino.

Para resolver estas problemáticas, en estudios recientes, se han investigado diversas tecnologías para abordar las tareas colaborativas en entornos submarinos. Por ejemplo, algunas investigaciones han optado por utilizar cámaras para la detección de objetos, combinándolas con sistemas de control PID y filtros de Kalman para optimizar su desempeño [1]. Otros estudios han explorado el empleo de módems acústicos junto con sistemas de control no lineal basados en modos deslizantes [2], integrando estas tecnologías con cámaras para mejorar la precisión en la localización. Además, se ha analizado el potencial del control predictivo, especialmente cuando se combina con módems acústicos, logrando así una mayor precisión y eficiencia en el control [3]. Asimismo, se ha propuesto el uso del control backstepping como una alternativa viable para enfrentar estos desafíos [4].

Es importante destacar que numerosos estudios previos han subestimado las limitaciones de comunicación que suelen presentarse en entornos marítimos, como los retrasos en la transmisión de datos, los prolongados períodos de muestreo generados por los sensores y la latencia inherente de los módems acústicos. Además, estos estudios han tendido a minimizar los efectos de las variaciones en la dirección y la fuerza de las corrientes oceánicas. Para enfrentar estos desafíos, se ha recurrido al uso de predictores, los cuales pueden clasificarse en dos categorías principales: predictores clásicos e inteligentes. En el ámbito de los predictores clásicos, se destacan métodos como la predicción mediante modelos autorregresivos [5], que han demostrado ser eficaces en escenarios como la formación de barcos con retrasos en la comunicación [6]. La combinación de estos métodos con técnicas de control predictivo se ha propuesto como una solución para optimizar los resultados durante el entrenamiento [7], y este enfoque también ha sido útil para mitigar el efecto de chattering inducido por retrasos en la comunicación, mejorando la precisión en el movimiento de brazos robóticos [8]. Entre estos enfoques, el filtro de Kalman se destaca por ser uno de los más utilizados, gracias a su amplia documentación y consistencia en los resultados. Sin embargo, es fundamental explorar nuevas estrategias para mejorar la precisión de las predicciones en entornos marinos, especialmente considerando las complejidades y variaciones que caracterizan a estos entornos submarinos. Una parte de la investigación se enfoca en utilizar los diversos métodos predictivos mencionados previamente para mitigar perturbaciones, prever señales o adaptarse a las dinámicas de las corrientes oceánicas. Sin embargo, es común que estos

métodos se apliquen de manera aislada, sin aprovechar las ventajas que podría ofrecer su combinación para predecir comportamientos marinos más complejos. Además, se suele ignorar el tiempo necesario para recopilar datos de los sensores antes de poder enviarlos al destino correspondiente, lo que afecta especialmente la coordinación entre diferentes ROV y limita su capacidad de trabajo en equipo. Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo abordar de manera conjunta todas estas consideraciones.

En relación con los predictores avanzados, nos adentramos en un campo que incorpora funciones de pertenencia y las fusiona con técnicas de control. Este enfoque se utiliza para realizar estimaciones precisas de la posición de un ROV, teniendo en cuenta la influencia de las corrientes oceánicas [9]. Otra área destacable son las Redes Neuronales Recursivas (RNN), que se destacan en el manejo de relaciones no lineales y patrones más complejos. Esta capacidad les permite compensar largos retrasos y periodos de frecuencia, así como predecir patrones en olas y corrientes oceánicas. En este sentido, se han observado resultados prometedores con técnicas como la red neuronal modificada (ECRNet) para predecir el deslizamiento provocado por las corrientes y mejorar la precisión de la trayectoria debido al ruido generado por un sensor GPS y donde la memoria ya está implementada en el predictor. Asimismo, el uso de Gated Recurrent Unit (GRU) [10] ha mostrado buenos resultados, al igual que la aplicación de sistemas RNN para mejorar la precisión en la posición de un planeador. Entre las técnicas más utilizadas por sus capacidades de memoria se encuentra LSTM (Long Short-Term Memory) y sus variantes. Se han aplicado para analizar las corrientes oceánicas y ajustar los parámetros de control PID en consecuencia. Esta metodología no solo facilita la comprensión de la dinámica de las corrientes oceánicas, sino que también permite la optimización del rendimiento del control PID para mantener una mayor precisión y una navegación estable en entornos marítimos variables y desafiantes. La integración de estos estudios actuales con ajustes dinámicos del control PID representa una estrategia eficaz para mejorar la adaptabilidad y la eficiencia de los sistemas de navegación submarina. [11], así como en la predicción actual para optimizar el control neuro-PID (Proporcional, Integral, Derivativo) [12]. Además, ha surgido una técnica llamada LSTM-Decay que está siendo ampliamente reconocida por su capacidad para predecir el retraso de tiempo y la pérdida de datos, fenómenos frecuentes debido a la comunicación no efectiva entre varios sensores. Esta variante de redes neuronales recurrentes se ha destacado por su capacidad para gestionar y mitigar los efectos adversos de la comunicación irregular entre sensores, proporcionando así una mejora significativa en la confiabilidad y precisión de la predicción de datos críticos [13]. Este enfoque ha sido utilizado en colaboración para localizar a un buzo y coordinar sus movimientos con un vehículo submarino. La combinación de ambos sistemas permite una sincronización precisa y efectiva entre las actividades del buzo y las maniobras del vehículo submarin [14]. Por otro lado, BiLSTM (LSTM bidireccional y unidireccional) ha demostrado ser útil para compensar el deslizamiento causado por el GPS acústico (sistema de posicionamiento global) [15], en otro artículo, se llevaron a cabo los experimentos, se ha demostrado que el modelo propuesto ha mejorado la precisión de predicción en términos de longitud, latitud y altitud. Estos resultados muestran la efectividad y confiabilidad del modelo desarrollado para estimar coordenadas geográficas y altitud con mayor precisión, proporcionando así una herramienta robusta y confiable para aplicaciones que requieren una localización precisa y consistente. [16]. En algunos estudios, se ha implementado el control difuso con funciones de pertenencia para estimar tanto el intervalo de muestreo como las perturbaciones. Esta estrategia se basa en la capacidad de la lógica difusa para gestionar incertidumbres y condiciones cambiantes, lo que permite realizar estimaciones precisas de parámetros clave que son fundamentales para mantener la estabilidad y el rendimiento del sistema. Al integrar funciones de membresía en esquemas de control difuso, los investigadores buscan mejorar tanto la exactitud como la robustez en la estimación del período de muestreo, mientras mitigan eficazmente las perturbaciones que podrían influir en el comportamiento del sistema. Este enfoque subraya la flexibilidad del control difuso al abordar desafíos complejos relacionados con el control y la evaluación dentro de diversas aplicaciones tecnológicas. [17]. Una parte sustancial de la investigación se enfoca en la implementación de diversos métodos predictivos para enfrentar perturbaciones, prever señales y ajustarse a las dinámicas de las corrientes oceánicas. No obstante, estos métodos a menudo se emplean de manera aislada, lo que limita la capacidad de aprovechar las sinergias que podrían surgir de su combinación para prever comportamientos marinos más complejos. Además, se suele subestimar la importancia del tiempo requerido para recolectar datos de los sensores y transmitirlos al destino correspondiente, lo que puede afectar negativamente la coordinación entre diferentes ROVs. Esta falta de sincronización disminuye su

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 18, pp. 246 - 264.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

eficacia en operaciones conjuntas. En este contexto, el presente trabajo busca abordar de manera integral todos estos aspectos, con el fin de mejorar la colaboración y optimizar el desempeño de los sistemas de navegación submarina.

2. Materiales y métodos

2.1 Cinemática e hidrodinámica de vehículos submarinos autónomos

Fossen [18] detalla los principales planos de referencia para la construcción del modelo matemático de un vehículo submarino. Uno de estos marcos de referencia es el fijo a la Tierra (marco fijo a la Tierra), mientras que el otro es relativo al marco fijo de referencia del vehículo. Ambos marcos presentan ejes ortogonales, denotados como X, Y, Z, para referirse respectivamente al plano del marco fijo a la Tierra y al plano del marco fijo a la carrocería X_b, Y_b, Z_b. Estos conceptos se ilustran visualmente en la Figura 1 el marco de referencia y ejes ROV2

La Sociedad de Arquitectos Navales y Marinos (SNAME) [18], siguiendo estándares y convenciones establecidos, ha mostrado una notación específica para describir la orientación, fuerzas y momentos aplicados a un vehículo. Este organismo establece la posición, velocidad y fuerzas de los vehículos como se detalla en la Tabla 1.

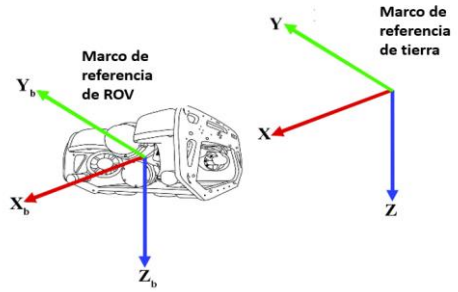


Figura 1. Marco de referencia y ejes ROV

Tabla 1. Notación de movimientos, nombre, posición, velocidad, fuerza y momentos.

Movimiento	Nombre	Posición	Velocidad	Fuerza/Momento
Translación X	Surge	*x*	*U*	*X*
Translación Y	Sway	*y*	*V*	*Y*
Translación Z	Heave	*z*	*W*	*Z*
Rotación X	Roll	ϕ	*p*	*K*
Rotación Y	Pitch	θ	*q*	*M*
Rotación Z	Yaw	ψ	*r*	*N*

La ubicación y las velocidades del vehículo en relación con el sistema de referencia pueden expresarse del siguiente modo:

$$\boldsymbol{\eta} = (x,y,z,\varphi,\theta,\psi)^T \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\nu} = (u, v, w, p, q, r)^T \quad (2)$$

Las fuerzas y momentos del vehículo en el diagrama de referencia pueden expresarse como:

$$\boldsymbol{\tau} = (X, Y, Z, K, M, N)^T \quad (3)$$

2.2 Modelo hidrodinámico

La formulación del modelo hidrodinámico del ROV puede representarse mediante la ecuación de Newton-Euler [18]:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau + \omega \quad (4)$$

$$\tau = B_t U_t \quad (5)$$

Donde:

$\boldsymbol{M} \in \mathbb{R}^{6x6}$ es la matriz inercial y de masa añadida,
$\boldsymbol{C} \in \mathbb{R}^{6x6}$ es la matriz centrípeta y de Coriolis del cuerpo rígido y la masa añadida,
$\boldsymbol{D} \in \mathbb{R}^{6x6}$ es la matriz de amortiguación hidrodinámica,
g $\in \mathbb{R}^{6x1}$ es el vector de fuerzas de restitución,
$\boldsymbol{B_t} \in \mathbb{R}^{6x6}$ es la matriz de asignación de propulsores,
$U_t \in \mathbb{R}^{6x1}$ es un vector que contiene la fuerza generada por los propulsores, y
ω $\in \mathbb{R}^{6x1}$ representa las perturbaciones medioambientales.

2.3 Esquema líder-seguidor

En el marco de esta investigación, se aplicará el método de líder-seguidor con el objetivo de facilitar la colaboración coordinada entre múltiples factores. Esta estrategia permitirá monitorear y controlar diversos parámetros, incluyendo la distancia tanto en el plano horizontal como en la dimensión de profundidad. Además, se manejarán los ángulos en los planos XY y Z, lo que añadirá un nivel adicional de precisión y flexibilidad al proceso de control. Como parte de nuestra metodología, se establecerá inicialmente una relación de coordinación en el plano bidimensional, para luego expandir y aplicar estas técnicas en un espacio tridimensional. Se ha tomado como referencia el uso de drones y se está aplicando este concepto al desarrollo de vehículos submarinos. En el análisis vectorial, la posición se define por:

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 18, pp. 246 - 264.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

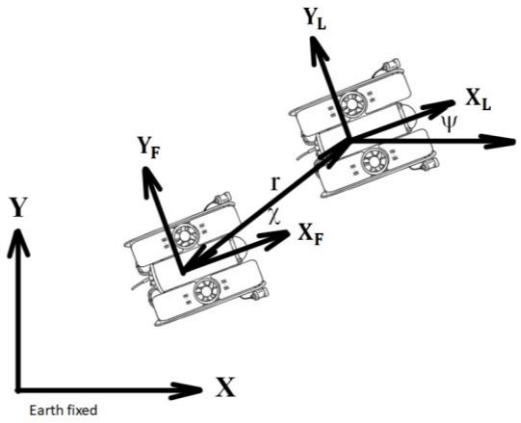


Figura 2. Relación vectorial entre el seguidor y el ROV líder en el plano XY

$$r_f = r_l + r \tag{6}$$

Donde la velocidad se escribe:

$$\dot{r_f} = \dot{r_l} + \dot{r} \tag{7}$$

Donde

$r_l =$ la posición del líder respecto al plano de referencia (r_{lx}, r_{ly}, r_{lz}),
$r =$ la distancia deseada entre el líder y el seguidor,
$r_f =$ La posición del seguidor con respecto al líder (r_{fx}, r_{fy}, r_{fz}),
$\dot{r_l} =$ la velocidad del líder hacia el plano de referencia $(\dot{r_{lx}}, \dot{r_{ly}}, \dot{r_{lz}})$,
$\dot{r} =$ a velocidad deseada entre el líder y el seguidor,
$\dot{r_f} =$ Velocidad del seguidor $(\dot{r_{fx}}, \dot{r_{fy}}, \dot{r_{fz}})$.

2.4 Controlador

La técnica de control empleada en este trabajo se basa en los modos deslizantes, una técnica de control no lineal utilizada para sistemas dinámicos que pueden estar sujetos a perturbaciones y no linealidades. Su objetivo es estabilizar el sistema y hacerlo robusto frente a perturbaciones y variaciones en los parámetros del sistema. Este enfoque se ha adoptado siguiendo la propuesta presentada en el artículo [16].

Una vez que cada ROV ha sido integrado de manera individual, uno como líder y otro como seguidor, el siguiente paso implica una integración adicional. En esta fase, se examinan los diagramas de control individuales de cada ROV. En el primer recuadro amarillo, se incorpora un predictor que recibe tanto las velocidades como las posiciones del seguidor. Posteriormente, se implementa el esquema líder-seguidor, que establece la posición y el ángulo deseados entre los vehículos, de acuerdo con las ecuaciones (3) a (18). Las variables de control y el sistema de control se detallan en la Tabla 2 y la Figura 4.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 18, pp. 246 - 264.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Tabla 2. Controles variables.

Simbolo	Variable
Error de posición	$\tilde{\eta}$
Error de velocidad	$\dot{\tilde{\eta}}$
Superficie de deslizamiento	S
Integral Constante	k_i
Constante derivada	k_d
Matriz de configuración del empuje	***B***
Matriz jacobiana	***J***

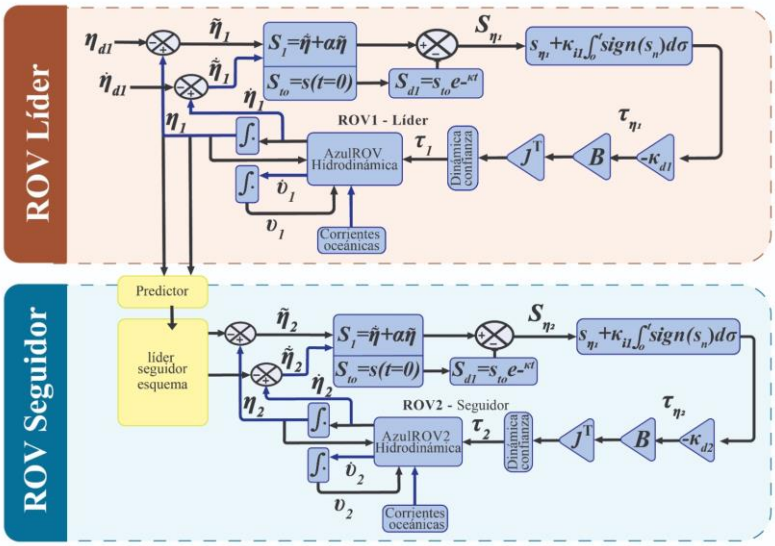


Figura 4. Control de la ley [16] y esquema líder-seguidor

2.5 Tipos de predictores

Un predictor, en el contexto de sistemas de control y dinámicos, es un componente o algoritmo que estima el comportamiento futuro de un sistema o proceso basándose en su estado actual y en entradas conocidas. En otras palabras, utiliza la información disponible en el presente para anticipar cómo evolucionará el sistema en el futuro. Estos predictores pueden basarse en modelos matemáticos del sistema, técnicas de aprendizaje automático o enfoques estadísticos, entre otros métodos. Su función principal es proporcionar estimaciones precisas que puedan utilizarse para tomar decisiones o realizar ajustes en tiempo real. En el contexto del control de vehículos, como en el caso de los ROV un predictor se emplea para prever la posición futura del vehículo, permitiendo planificar y ejecutar movimientos de manera eficiente y segura.

Los predictores utilizados en este artículo son:

I. Mínimos cuadrados recursivos con olvido (LS)
II. Filtro de Kalman
III. MLP (Multilayer Perceptrón),

I. El método de Mínimos Cuadrados Recursivos (LS) es una técnica de estimación de parámetros utilizada en diversas áreas, como el procesamiento de señales, control e inteligencia artificial. Su

principal objetivo es estimar los parámetros de un modelo matemático a partir de una serie de observaciones o mediciones, minimizando el error cuadrático medio entre las observaciones reales y las predicciones del modelo. La característica recursiva de este método permite actualizar continuamente la estimación de los parámetros del modelo a medida que se reciben nuevas observaciones, en lugar de estimar todos los parámetros simultáneamente. Esto lo hace especialmente útil para aplicaciones en tiempo real, donde los datos se reciben de manera continua y es necesaria la estimación en tiempo real de los parámetros del modelo [19].

II. El filtro de Kalman es un algoritmo de estimación que se utiliza para predecir el estado de un sistema dinámico a partir de una serie de mediciones ruidosas. Fue desarrollado por el matemático y estadístico Rudolf Kalman en la década de 1960 y se ha convertido en una herramienta fundamental en una amplia gama de campos, incluyendo la ingeniería, la navegación, la robótica y la economía, entre otros. El filtro de Kalman opera de manera recursiva, lo que significa que realiza estimaciones en tiempo real basándose en mediciones recientes y estimaciones previas del estado del sistema. Funciona en dos fases principales: predicción y actualización [20].

Las redes neuronales recurrentes aplicadas a series temporales son un enfoque para modelar y predecir datos secuenciales que tienen una estructura temporal. A diferencia de otros modelos de series temporales, como los modelos autorregresivos o las redes neuronales recurrentes (RNN), las redes neuronales recurrentes abordan la naturaleza recursiva de las series temporales, donde los valores futuros dependen de los valores pasados y presentes, pero también pueden depender de relaciones más complejas y no lineales dentro de la serie temporal. En este contexto, se manejan MLP (Perceptrón Multicapa) [21].

III. MLP (Perceptrón Multicapa) es un tipo de arquitectura de red neuronal artificial en la que múltiples capas de nodos (neuronas) están conectadas en una estructura de retroalimentación. Cada neurona en una capa está conectada a todas las neuronas de la siguiente capa, sin conexiones recurrentes, lo que significa que la información fluye en una sola dirección, desde la entrada hasta la salida [22].

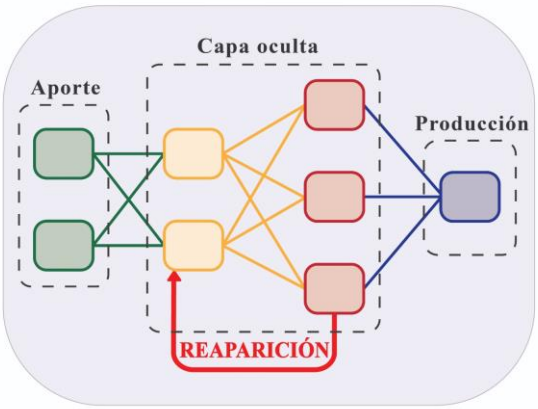


Figura 5. Estructura básica del MLP

Cuando se aplican a series temporales, los MLP (Perceptrones Multicapa) son capaces de modelar relaciones complejas entre las características de entrada y las salidas deseadas como una función del tiempo. [22].

2.6 Diseños de simulación

Los parámetros del robot, así como su masa, centro de flotación, momento de inercia, se pueden encontrar en el artículo [16]. Las características del solver para realizar las simulaciones son las siguientes Tabla 3:

Tabla 3. Características del solver:

Movement	Name
Tipo:	Paso variable
Max Step Size	0.1
Tamaño de paso mín.	0.0005
Tolerancia relativa	0.001
Solver	Ode45(Dormant-Prince)

Esta sección ofrece una descripción concisa y precisa de los resultados experimentales, su interpretación y las conclusiones que pueden extraerse de la simulación.

Simulación 1:

I. En el ROV1 es el líder y el ROV2 es el seguidor.
II. El sensor líder tiene un periodo de muestreo de 200 ms y no hay retardo en la transmisión de datos entre el líder y el seguidor.
III. Trayectoria helicoidal.
IV. Esquema líder-seguidor
V. Se proponen varios predictores LS, MLP y predictores Kalman.

Simulación2:

Las simulaciones tuvieron las siguientes características:
I. En el ROV1 es el líder y el ROV2 es el seguidor.
II. El sensor del líder tiene un periodo de muestreo de 200 ms y la transmisión de in-formación del líder al seguidor tiene un retardo de 200 ms (para elegir estos valores se hicieron pruebas preliminares modificando el tiempo de muestreo, el retardo y las corrientes, se encontró que a 200 ms se pueden afectar en diferentes condiciones y lograr los valores deseados).
III. Trayectoria helicoidal.
IV. Esquema líder-seguidor.
V. Se proponen varios predictores LS, MLP, y predictores Kalman.

El objetivo de estas simulaciones es reproducir la comunicación mediante módems acústicos, con una latencia y un periodo de muestreo de los sensores de 200 ms, como se ilustra en la Figura 8 que aparece a continuación. Las simulaciones pretenden modelar con precisión los procesos de transmisión y recepción que intervienen en la comunicación por módem acústico, poniendo de relieve su rendimiento en las condiciones de latencia y los intervalos de muestreo de datos de los sensores especificados.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 18, pp. 246 - 264.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

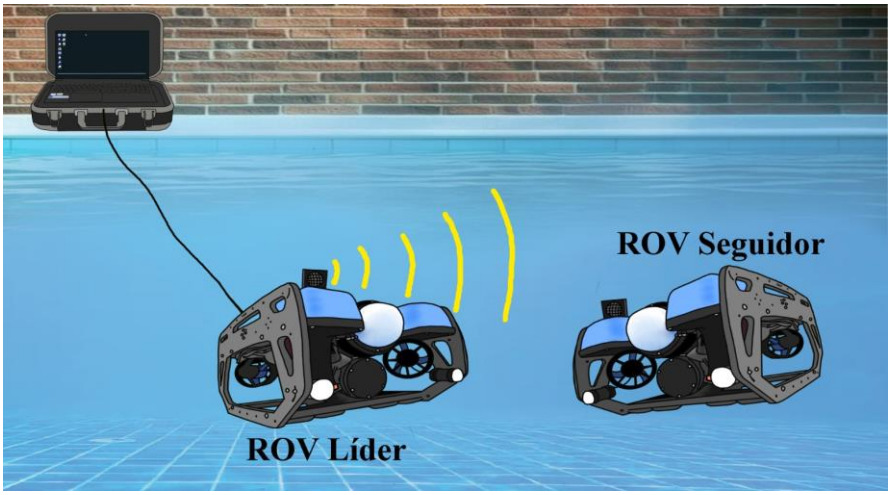


Figura 6. Comunicación acústica entre líder y seguidor

2.7 Corrientes marinas

Para el análisis del sistema se tienen en cuenta las corrientes marinas, descritas con detalle en el trabajo de Fossen [17]. Se supone que estas corrientes se extienden tridimensionalmente y carecen de rotación, siguiendo el modelo propuesto en dicha referencia bibliográfica.

$$V_c = [u_c\ v_c\ w_c\ \ 0\ 0\ \ 0\ ]^T \tag{32}$$

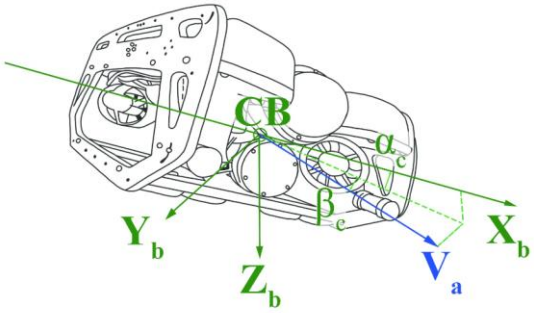


Figura 7. Composición vectorial de las corrientes marinas

Donde

$$u_c = V_c\ cos\ (\alpha_c)\ \ cos\ (\beta_c) \tag{33}$$
$$v_c = V_c\ sin\ (\beta_c) \tag{34}$$
$$w_c = V_c\ sin\ (\alpha_c)\ \ cos\ (\beta_c) \tag{35}$$

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 18, pp. 246 - 264.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

La velocidad de la corriente se identifica como $\boldsymbol{V_c}$, mientras que la orientación relativa de las corrientes se describe mediante los ángulos de ataque $\boldsymbol{\alpha_c}$ y de deslizamiento $\boldsymbol{\beta_c}$.. En el contexto específico, $\boldsymbol{u_c}$ representa la corriente procedente del norte, $\boldsymbol{v_c}$la procedente del este, y w_c la procedente de la profundidad, como se ilustra en la figura 7.

Para optimizar la apreciación de las ventajas entre las distintas simulaciones, sugerimos variar los ángulos de corriente $\boldsymbol{\alpha_c}$ y $\boldsymbol{\beta_c}$, con el fin de captar con mayor precisión los cambios en el medio marino y la capacidad de adaptación de los predictores propuesto s. Los valores de $\boldsymbol{\alpha_c} = \boldsymbol{sin}\ (\boldsymbol{1.5\ t})$, y $\beta_c = \boldsymbol{cos}\ (\boldsymbol{5t})$ se establecen, con $\boldsymbol{V_c}$=1.2. Sustituyendo estos valores en las ecuaciones (36), (37), (38), se presentan como sigue:

2.8 Trayectoria

$$u_c = 1.2\ cos\ (sin\ \ (1.5\ t\ ))\ cos\ (co\ s(5t)), \tag{36}$$

$$v_c = 1.2\ sin\ (co\ s(5t)) \tag{37}$$

$$w_c = 1.2\ sin\ (sin\ (1.5\ t))\ \ cos\ (co\ s(5t)) \tag{38}$$

$$x_d = cos\ (wt) \tag{39}$$

$$y_d = sin\ (wt) \tag{40}$$

$$z_d = \ t_s\ t \tag{41}$$

$$\psi_d = wt \tag{42}$$

La trayectoria planificada tendrá forma de espiral (figura 8), ya que implica cambios tanto de posición como de velocidad a lo largo de varios ejes, como el avance, el desplazamiento lateral, el ascenso y la rotación. Estas posiciones, que deben controlarse y supervisarse durante el movimiento, se definen mediante las coordenadas $(\boldsymbol{x, y, z,}\psi)$,, w es constante y $\boldsymbol{t_s}$ es el tiempo de descenso. Las posiciones deseadas en la ruta se identificarán como η_d, mientras que las velocidades deseadas se representarán como $\dot{\eta}_d$.

$$\eta_d = (\boldsymbol{x_d, y_d, z_d, \psi_d}\ )$$

Donde $\boldsymbol{x_d, y_d, z_d}$, son la posición deseada y $\boldsymbol{\psi_d}$ es el ángulo deseado. Diferenciando las ecuaciones (39) a (42) con respecto al tiempo se obtiene:

$$\dot{x_d} = -\sin\ (wt) \tag{43}$$

$$\dot{y_d} = cos\ \ wt \tag{44}$$

$$\dot{z_d} = \ t_s \tag{45}$$

$$\dot{\psi}_d = w \tag{46}$$

Los valores que se tomaron en la simulación: $t_s = -\frac{1}{3}$ s y $w = \frac{\pi}{8}\ \frac{rad}{s}$

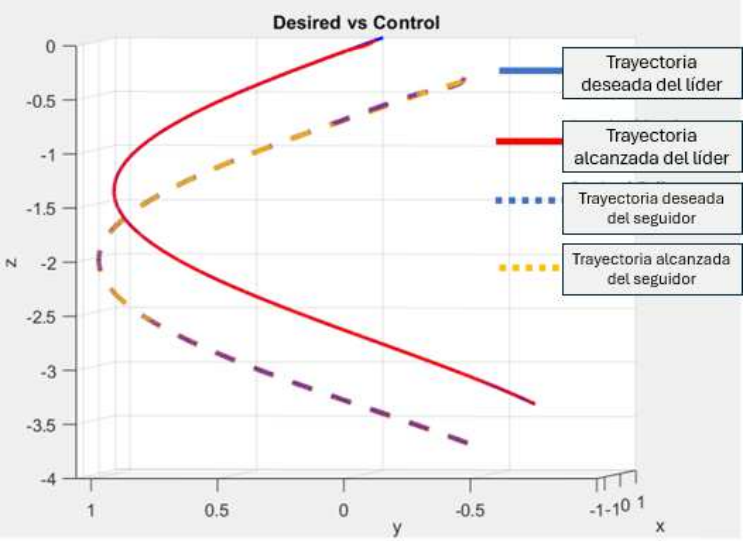


Figura 8. Trayectoria de la simulación

2.9 Entrenamiento

Para mejorar las condiciones y obtener un conjunto de datos más amplio y diverso para el entrenamiento, se empleó la técnica de aumento de datos. Esta estrategia permite generar versiones modificadas del conjunto de datos original, lo que a su vez asegura una mayor cantidad de información y una variedad de casos. El aumento de datos no solo expande el volumen del conjunto, sino que también enriquece la diversidad de las muestras, facilitando así una mejor generalización del modelo. Al contar con un conjunto de datos más robusto y variado, las predicciones se vuelven más precisas y fiables, ya que el modelo tiene la oportunidad de aprender de una gama más extensa de situaciones y escenarios. Se recurrió a:

A. Jittering (Añadir Ruido): Consiste en agregar pequeñas cantidades de ruido aleatorio a los valores originales de la serie temporal. Esta técnica busca simular pequeñas variaciones que podrían ocurrir en un entorno real sin cambiar la estructura general de los datos. Es útil para evitar el sobreajuste, ya que el modelo se expone a ligeras desviaciones en los valores.

B. Escalado: Modifica la escala de los datos, es decir, multiplica o divide todos los puntos de la serie por un valor constante. El objetivo es simular diferentes magnitudes o variaciones en la amplitud sin alterar el patrón de comportamiento temporal [23].

C. Time Warping (Distorsión del Tiempo): Altera la velocidad con la que ocurre la secuencia de eventos en la serie temporal, comprimiendo o expandiendo ciertas secciones del tiempo. Esto introduce una variación en el comportamiento temporal, lo que ayuda a que el modelo sea más resistente a cambios en la velocidad de los fenómenos representados por los datos [24].

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 18, pp. 246 - 264.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

3. Resultados

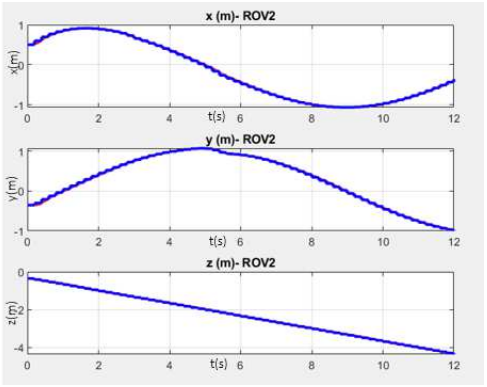
3.1 Simulación 1.

Las líneas azules en los gráficos representan las trayectorias que se desean alcanzar, mientras que las líneas rojas indican el movimiento real del ROV seguidor. En las simulaciones que se presentan a continuación, se enfoca exclusivamente en los resultados del ROV2, que es el robot encargado de seguir la trayectoria. Esto se debe a que el ROV2 enfrenta los mayores desafíos en cuanto a la comunicación, y estos desafíos constituyen un área clave de mejora. Cada 200 milisegundos (0,2 segundos), el ROV recibe una actualización instantánea de su posición, lo que implica que está constantemente ajustando su rumbo para seguir la trayectoria deseada. No obstante, el intervalo de actualización de 200 ms puede ocasionar que el ROV enfrente dificultades para alcanzar con precisión su punto de ajuste.

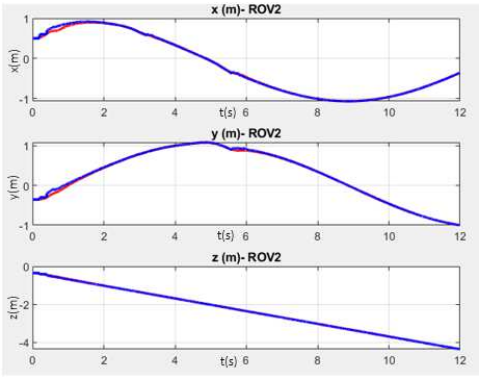
La influencia de las variaciones en los resultados se hace evidente a través de representaciones gráficas, que permiten visualizar las oscilaciones generadas debido al amplio intervalo de muestreo utilizado. Cabe destacar que tanto los controladores inteligentes como los métodos de mínimos cuadrados demuestran una ventaja considerable en la aproximación de las curvas sin saturar las salidas del motor, como se detalla en el análisis presentado en la Figura 8.

En la Figura 9 se representan en azul las trayectorias deseadas, mientras que en rojo las trayectorias seguidas por el ROV. Cada posición se indica en los gráficos correspondientes. En la Figura 9.a, con un periodo de muestreo de 200 ms y sin ningún predictor, se observa un fenómeno conocido como shattering, similar al mostrado en la Figura 10.a. En las Figuras 10.b a 11.d se implementan diversos predictores que ayudan a reducir el ruido y mejorar la aproximación a las trayectorias deseadas.

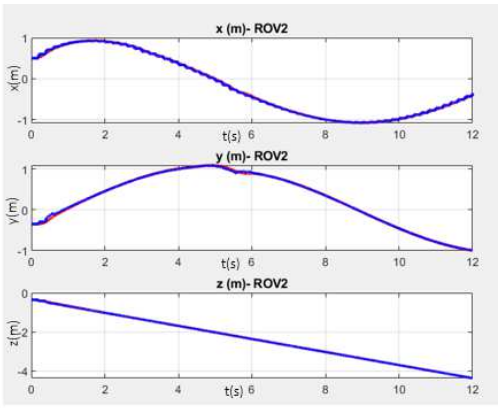
Un aspecto importante a tener en cuenta al considerar estos diferentes predictores es el efecto sobre la señal de salida, donde la reducción del traqueteo se traduce en un beneficio directo en el consumo de energía. Como se puede ver en la Figura 11.a, la saturación de la salida y la sobrecarga del motor se producen cuando no se utiliza ningún predictor, mientras que en la Figura 11.b y la Figura 11.d se observa una mejora con la implementación de predictores clásicos. Los predictores modernos, como se muestra en la Figura 10.e a la Figura 10.d, son más capaces de identificar patrones de movimiento, lo que contribuye significativamente a la reducción del traqueteo.



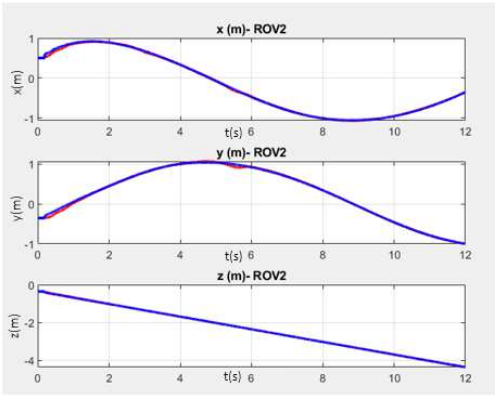
(a) Seguidor 2nd SMC



(b) Seguidor 2nd SMC+ LS

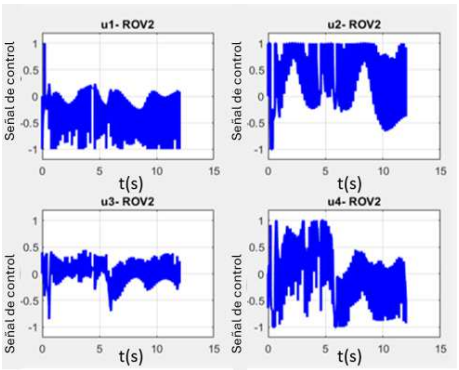


(c) Seguidor 2nd SMC +Kalman

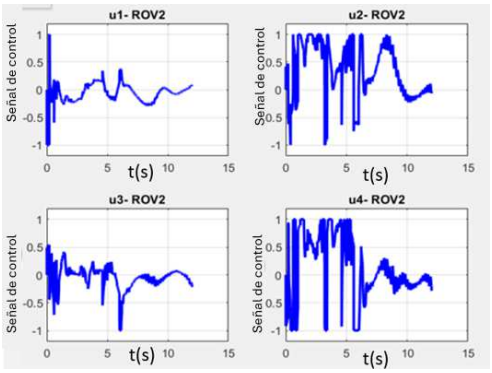


(d) Seguidor 2nd SMC+MLP

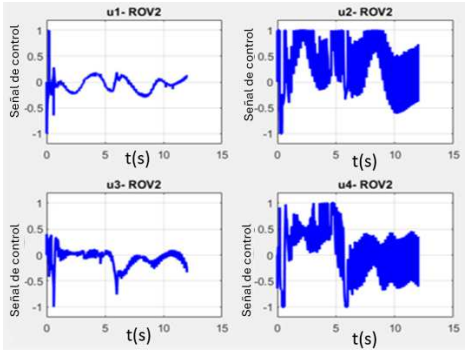
Figure 9. Resultados de la simulación de posición de diferentes predictores sin corrientes oceánicas



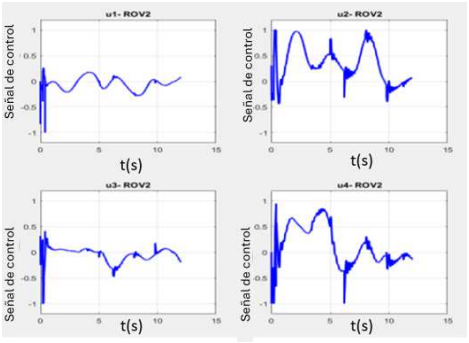
(a) Seguidor 2nd SMC



(b) Seguidor 2nd SMC+ LS



(c) Seguidor 2nd SMC +Kalman



(d) Seguidor 2nd SMC+MLP

Figure 10. Resultados de la simulación de propulsores de diferentes predictores sin corrientes oceánicas

Una vez finalizadas las simulaciones, se calcularon tanto el consumo de energía como el error cuadrático medio. En una primera etapa, las simulaciones se llevaron a cabo excluyendo la influencia

de las corrientes marinas, tal como se especifica en los detalles de la Tabla 2. Posteriormente, se incorporaron las corrientes marinas a las simulaciones, y estos datos se reflejan en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados sin corrientes oceánicas

Medida	Sin predictor	LS	MLP	Kalman
Error medio cuadrado	0.084	0.048	0.052	0.049
Potencia (W)	14,488.6	13,070	12,922	14,004

Tabla 5. Resultados con corrientes oceánicas

Medida	Sin predictor	LS	MLP	Kalman
Error medio cuadrado	0.084	0.048	0.052	0.049
Potencia (W)	14,488.6	13,070	12,922	14,004

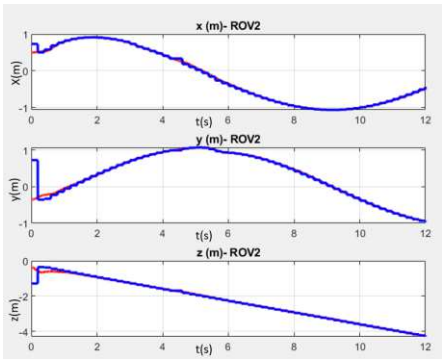
Los efectos provocados por el retardo y el largo periodo de muestreo dan lugar a oscilaciones y desviaciones respecto al valor deseado. Sin la inclusión de predictores, estos efectos serían inevitables. Sin embargo, al introducir predictores se observan mejoras significativas en los resultados. Los predictores clásicos muestran mejoras, aunque no las suficientes para evitar por completo las oscilaciones, mientras que los predictores inteligentes consiguen una predicción más precisa y evitan la saturación del motor de forma más eficaz (Tabla 4 y Tabla 5).

3.2 Simulación 2.

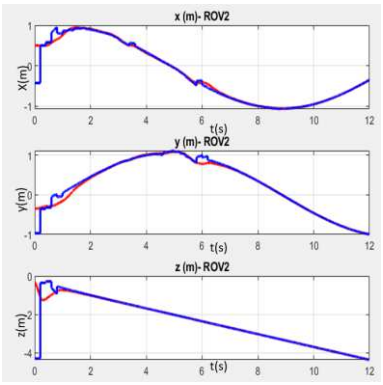
Las líneas tienen la misma representación que en la primera simulación. En la segunda simulación, se introduce un retraso en la comunicación. Esto hace que el ROV se vuelva estático inicialmente. Para compensar este retraso, se utilizan predictores para intentar adivinar la posición del ROV. Al principio, debido al retraso y a la falta de datos precisos, puede parecer que los predictores comienzan en condiciones diferentes. Sin embargo, a medida que se recopilan más datos, los predictores ajustan y mejoran sus estimaciones de la posición del ROV.

La implementación de retos como el periodo de muestreo y el retardo genera impulsos que pueden afectar la capacidad de alcanzar la trayectoria deseada, como se ve en la Figura 11a y Figura 12a, donde los motores pueden saturarse. Un hallazgo interesante es que, al introducir cambios variables en el tiempo en la dirección y magnitud de la corriente, los predictores clásicos (Figura 12b, Figura 12c) muestran más fallos y una ligera reducción en el shattering en la Figura 12b y Figura 12c. Cuando se implementan predictores, se observa una disminución de estos efectos, aunque las mejoras no son significativas en la Figura 11d. En contraste, MLP tiene la ventaja de detectar más fácilmente patrones no lineales en el sistema, lo que resulta en una reducción sustancial del shattering en comparación con otras propuestas. En conclusión, el uso de MLP destaca por su capacidad para gestionar eficazmente los retos, mejorando notablemente la precisión y estabilidad del seguimiento de trayectorias en entornos adversos.

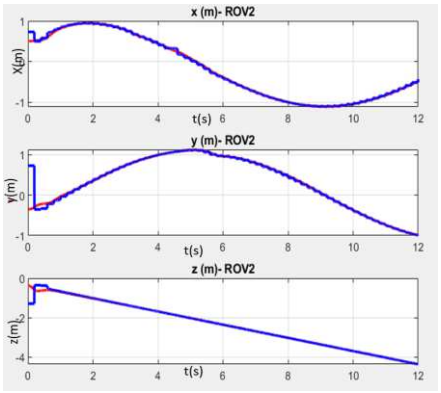
Convergencia Mecatrónica, Capítulo 18, pp. 246 - 264.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.



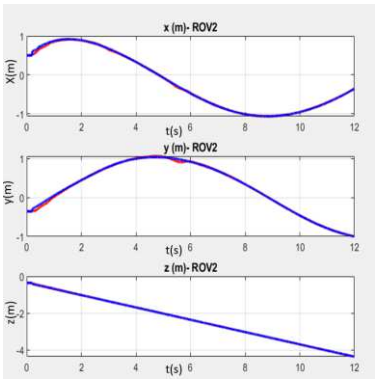
(a) Seguidor 2nd SMC



(b) Seguidor 2nd SMC+ LS

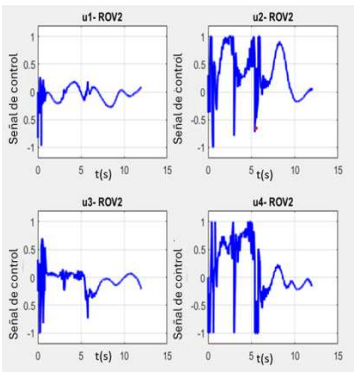


(c) Seguidor 2nd SMC +Kalman

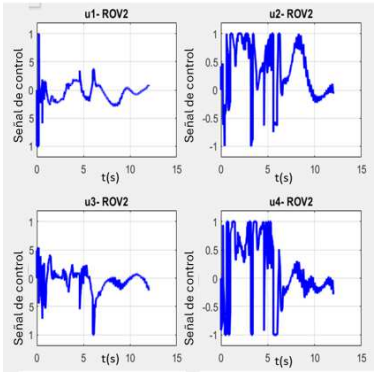


(d) Seguidor 2nd SMC+MLP

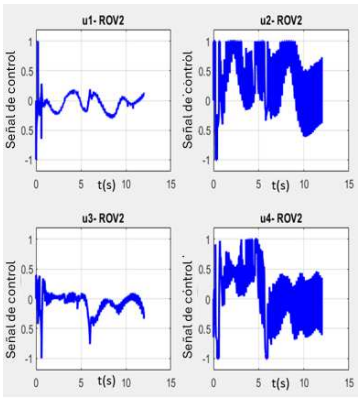
Figure 11. Resultados de la simulación de posición de diferentes predictores sin corrientes oceánicas



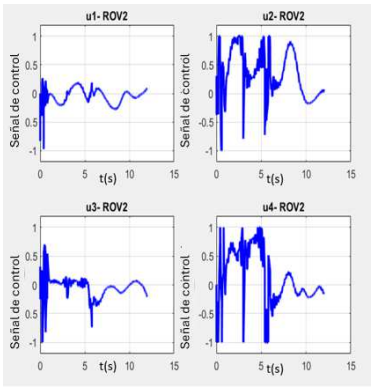
(a) Seguidor 2nd SMC



(b) Seguidor 2nd SMC+ LS



(c) Seguidor 2nd SMC +Kalman



(d) Seguidor 2nd SMC+MLP

Figure 12. Resultados de la simulación de la posición de diferentes predictores con corrientes oceánicas cambiantes

En la siguiente fase, se realizaron simulaciones sin considerar la influencia de las corrientes oceánicas, como se muestra en la Tabla 6. Luego, se incorporaron las corrientes oceánicas a las simulaciones y los resultados correspondientes se muestran en la Tabla 7 donde el MLP logra mejores resultados.

Tabla 6. Resultados sin corrientes oceánicas

Medida	Sin predictor	LS	MLP	Kalman
Error medio cuadrado	0.115	0.104	0.118	0.076
Potencia (W)	15,182	13,162	13,092	14,707

Tabla 7. Resultados con corrientes oceánicas

Medida	Sin predictor	LS	MLP	Kalman
Error medio cuadrado	0.084	0.048	0.052	0.049
Potencia (W)	14,488.6	13,070	12,922	14,004

4. Conclusiones

Las tareas colaborativas en entornos submarinos presentan múltiples desafíos relacionados con el control, debido a su naturaleza inherentemente no lineal. Para abordar estos desafíos, es necesario aplicar enfoques específicos, como el control no lineal, siendo el control por modos deslizantes de segundo orden una técnica relevante en este contexto. Además, uno de los principales retos en la colaboración entre dispositivos es asegurar una comunicación efectiva. Los retrasos en la transmisión pueden causar desviaciones significativas en las trayectorias planificadas y periodos prolongados de muestreo, lo que puede afectar negativamente el rendimiento de los sistemas de control, especialmente cuando se enfrentan a perturbaciones como cambios en las corrientes oceánicas.

Los predictores clásicos, como el filtro de Kalman y los mínimos cuadrados, han mostrado ser eficaces para predecir cambios en condiciones monótonas, lo que les permite aproximarse con precisión a las posiciones y velocidades deseadas. Sin embargo, su capacidad para lidiar con salidas sobresaturadas en motores puede ser limitada. En cambio, los predictores inteligentes, como las redes neuronales recurrentes y las redes neuronales de perceptrones multicapa (MLP), ofrecen excelentes ventajas al ser capaces de identificar patrones no lineales de manera más efectiva y adaptarse mejor a los cambios. La MLP se ha destacado por su capacidad para predecir conductas ocultas y minimizar el consumo de energía.

En la primera simulación, con un periodo de muestreo de 200 ms y la presencia de corrientes, se observó una mejora en el rendimiento al utilizar diversos predictores en comparación con la ausencia de cualquier predictor. En este escenario, el predictor de mínimos cuadrados (LS) mostró una mejora del 10%, el perceptrón multicapa (MLP) un 10,8%, el filtro de Kalman un 3,3%, el. Estos resultados indicaron que los predictores avanzados, como el MLP, superaron a los métodos clásicos en términos de adaptación a cambios complejos. En la segunda simulación, se introdujo un retardo adicional de 200 ms bajo las mismas condiciones que la primera simulación. Con este ajuste, los resultados fueron: LS mejoró un 2,9%, MLP un 8,6%, Kalman un 2,6%. En esta ocasión, el MLP demostró ser el más eficiente, logrando la mayor mejora y reduciendo significativamente el consumo de energía en comparación con los demás predictores.

En futuras investigaciones, se podrían incorporar nuevas variables que podrían afectar la comunicación entre ROV.

- Estas variables incluyen factores ambientales como la presión del agua, la temperatura y la salinidad.
- La consideración de pérdidas de información durante la transmisión.
- La posibilidad de obstáculos que podrían interferir con la comunicación.
- Evaluar cómo el aumento del número de ROV podría influir en la eficacia de las comunicaciones.
- Explorar estas variables adicionales podría proporcionar una comprensión más completa de los desafíos y las posibles soluciones en las comunicaciones submarinas entre ROV.

Referencias

[1] PI R., Cieślak P., Ridao P. y Sanz P., TWINBOT: Autonomous Underwater Cooperative Transportation, IEEE Access (Volume: 9) ,2021, Pages: 37668 – 37684.
[2] C G., Kostas K. y Kyriakopoulos J., Towards Cooperation of Underwater Vehicles: A Leader-Follower Scheme Using Vision-based Implicit Communications, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015, 1-6.
[3] Simetti E., y Casalino G., Manipulation and Transportation with Cooperative Underwater Vehicle Manipulator Systems, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2017, 782 – 799.
[4] Gao Z. y Guo G., Fixed-Time Leader-Follower Formation Control of Autonomous Underwater Vehicles with Event-Triggered Intermittent Communications", IEEE Access Volume: 6, 2018, 27902 – 27911.
[5] Zhang J., Mou J., Chen L., Chen P., y Li M., Cooperative model predictive control for ship formation tracking with communication delays, Ocean Engineering Volume 291,2023, 1-9.
[6] Huang H., Tang J. y Zhang B.,Positioning Parameter Determination Based on Statistical Regression Applied to Autonomous Underwater Vehicle, Marine Science and Engineering, 2021, 1-21.
[7] Zhang J., Mo J.,Chen L., Chen P. y Li M., Cooperative model predictive control for ship for-mation tracking with communication delays, Ocean Engineering Volume 291, 2024, 1-9.
[8] Liu M.,Tang Q., Li Y., Liu C., y Yu M., A Chattering-Suppression Sliding Mode Controller for an Underwater Manipulator Using Time Delay Estimation, Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 1-15,
[9] Yu Y., Zhang J., y Zhang Y., AUV Drift Track Prediction Method Based on a Modified Neural Network,Computing and Artificial Intelligence, Applied Sciences Volume 11, issue 9, 2022, 1-17.

[10] Xuebo J., Aiqiang Y., Tingli S. y Jianlei K., GRU-Based Estimation Method Without the Prior Knowledge of the Noise, Proceedings of the 11th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC2019), 2019, 927–935.
[11] Hu L., Zhang M., Yuan Z., Zheng H. y Wenbin H., Predictive Control of a Heaving Compensation System Based on Machine Learning Prediction Algorithm, Control and Optimization for Offshore Renewable Energy, Journal of Marine Science and Engineering, 2023,1-18.
[12] Sang-Ki J., Dea O., Seo J., Min J. y Sik H., Disturbance learning controller design for un-manned surface vehicle using LSTM technique of recurrent neural network, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2021, 1-11,
[13] Wei X., Liu Y., Gao S., Wang X. y Yue H., An RNN-Based Delay-Guaranteed Monitoring Framework in Underwater Wireless Sensor Networks, IEEE Access (Volume: 7), 2019, 25959 – 25971.
[14] Chavez A., Mueller C., Birk A., Babic A. y Miskovic N., Stereovision based diver pose estimation using LSTM recurrent neural networks for AUV navigation guidance, OCEANS 2017 - Aberdeen, 2017,1-7.
[15] Peng L., He B., y Guo J., Position Correction Model Based on Gated Hybrid RNN for AUV, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 5648 – 5657.
[16] Wu C., Dai Y., Shan L. y Zhu Z., Date-Driven Tracking Control via Fuzzy-State Observer for AUV under Uncertain Disturbance and Time-Delay, Journal of Marine Science and Engineering Volume 11 Issue 1, 2023, 1-26.
[17] Fossen, T.I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control; John Wiley & Sons, Ltd.: Chichester, UK, 2011; ISBN 9781119994138.
[18] González J., Narcizo N., García L., Salgado T., Gómez A., Cuan E. y Escobedo J., Model-Free High Order Sliding Mode Control with Finite-Time Tracking for Unmanned Underwater Vehicles, Applied Science, 2021, 1-21.
[19] Rezaee H., y Abdollahi F., Synchronized Cross Coupled Sliding Mode Controllers for Cooperative UAVs with Communication Delays, 2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2012, 1-6.
[20] Hansen L. y Sargent T., Recursive Models of Dynamic Linear Economies, 2005.
[21] Grewal M. y Andrews A., Matlab - Kalman filtering Theory and practice using MATLAB 2nd Edition, 2001, ISBN 0-471-26638-8.
[22] Aggarwal C., Neural Networks and Deep Learning: A Textbook, 2023, ISBN: 978-3319944623.
[23] Guennec A., Malinowski S.,Tavenard R., Data Augmentation for Time Series Classification using Convolutional Neural Networks. ECML/PKDD Workshop on Advanced Analytics and
Learning on Temporal Data, 2016.
[24], Iglesias G., Talavera E.,Gonzalez A., Mozo A., Canaval S., Data Augmentation techniques in time series domain: a survey and taxonomy,Neural Computing and Applications, 2023.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 265 - 287.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Diseño y Construcción de un Módulo Didáctico con Controlador Lógico Programable y Robot Manipulador con 6 Grados de Libertad

Reveles Martínez Rafael, De La Torre Rivas Noé, López González Alejandro, Jaramillo Martínez Ramón, Ramírez Mora Javier y Morales Magallanes Humberto

Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas. Zacatecas, México

Correo: rrevelesm@ipn.mx

Resumen

Se tiene el objetivo de diseñar y construir un prototipo didáctico que integre un robot manipulador de 6 grados de libertad, un tablero eléctrico y un controlador lógico programable (PLC) para el auto equipamiento del Laboratorio de Control y Automatización dentro de la unidad. Tener un prototipo didáctico en lugar de comprar equipos comerciales dado el alto costo de estos, permitirá una mejor adaptación a las necesidades específicas de algunas unidades de aprendizaje como Autómatas Industriales, Control de Sistemas Mecatrónicos Robóticos y Control de Máquinas Eléctricas, entre otras. Ofrecerá una mayor flexibilidad en su uso educativo y reducirá costos, además de fomentar una compresión más profunda y práctica de los sistemas involucrados

Palabras Clave: Automatización, HMI, Manipulador, PLC, Prototipo.

1. Introducción

El módulo didáctico planteado permitirá a los alumnos adquirir experiencia práctica en áreas como electrónica, programación, robótica, automatización y control. Los estudiantes podrán presenciar la interacción entre estas tecnologías, aplicando los conceptos y teorías en un entorno práctico. Unidades de aprendizaje específicas como Autómatas, Automatización, Control Clásico, entre otras, se beneficiarán del uso de este prototipo. Además, podrán profundizar en temas cruciales como la cinemática, dinámica de robots, control de movimientos, integración de sensores y actuadores.

Se diseñará y construirá un prototipo didáctico que integre un robot manipulador de 6 grados de libertad, un tablero eléctrico y un PLC para el auto equipamiento del laboratorio de control y automatización.

Específicamente tendrá la estructura mecánica para un sistema robótico manipulador de 6 grados de libertad, que cubra un área de trabajo aproximada de 2 m^3 . Se implementará un control retroalimentado, para cada articulación del robot.

La robótica es muy importante en la industria por su productividad y competitividad. Los robots permiten realizar tareas repetitivas de manera precisa y consistente, incrementado la eficiencia en los procesos industriales.

La cinemática y dinámica son cruciales para entender y controlar el movimiento de los robots manipuladores. La cinemática directa calcula la posición del efector final, y la inversa resuelve las variables necesarias para alcanzar una posición deseada [1].

Por otro lado, la dinámica se centra en las fuerzas y torques necesarios para el movimiento deseado. La ecuación de Euler-Lagrange, utilizada para modelar la dinámica de sistemas robóticos, proporciona una base para diseñar controladores que aseguren movimientos precisos [2].

El control de movimiento en robótica es crucial para la precisión y estabilidad. El control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) se utiliza ampliamente por su simplicidad y eficacia. Este controlador ajusta la salida de control basada en el error presente, acumulado y su tasa de cambio, permitiendo una corrección precisa del movimiento del robot. [3]

Se diseñará un sistema de circuitos eléctricos y/o electrónicos que alimente todo el sistema, y que acondicione las señales entre el robot, el PLC y los elementos eléctricos.

Los PLC son esenciales en la automatización industrial. Estos dispositivos se programan utilizando lenguajes estándar como Ladder Diagrama (LD), que facilitan la implementación y modificación de programas [4]. Manejan múltiples entradas y salidas, y ejecutan operaciones lógicas que controlan equipos y maquinaria eficientemente. [5]

En la actualidad, las industrias automatizadas emplean como elemento básico los controladores, los encargados de controlar todos los procesos y sistemas presentes en la industria. Estos dispositivos cuentan con la capacidad de programarse y reconfigurarse para adaptarse a las tareas que la producción requiera.

Se diseñará e implementará una Interfaz Hombre Máquina HMI que permita programar y monitorear los movimientos del robot, tomando en cuenta que facilita la interacción entre operadores y máquinas, permitiendo monitorear y controlar procesos industriales mediante pantallas táctiles y gráficos intuitivos en tiempo real [6]

2. Materiales y métodos

Se utilizó la metodología IDEF-0 para definir el proceso que debe llevar a cabo el robot manipulador de 6 Grados de Libertad, tomando en cuenta las funciones requeridas por el usuario. El uso de estos diagramas permite acotar los parámetros y necesidades a cumplir con el prototipo, asegurando un enfoque basado en el ámbito didáctico.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 265 - 287.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

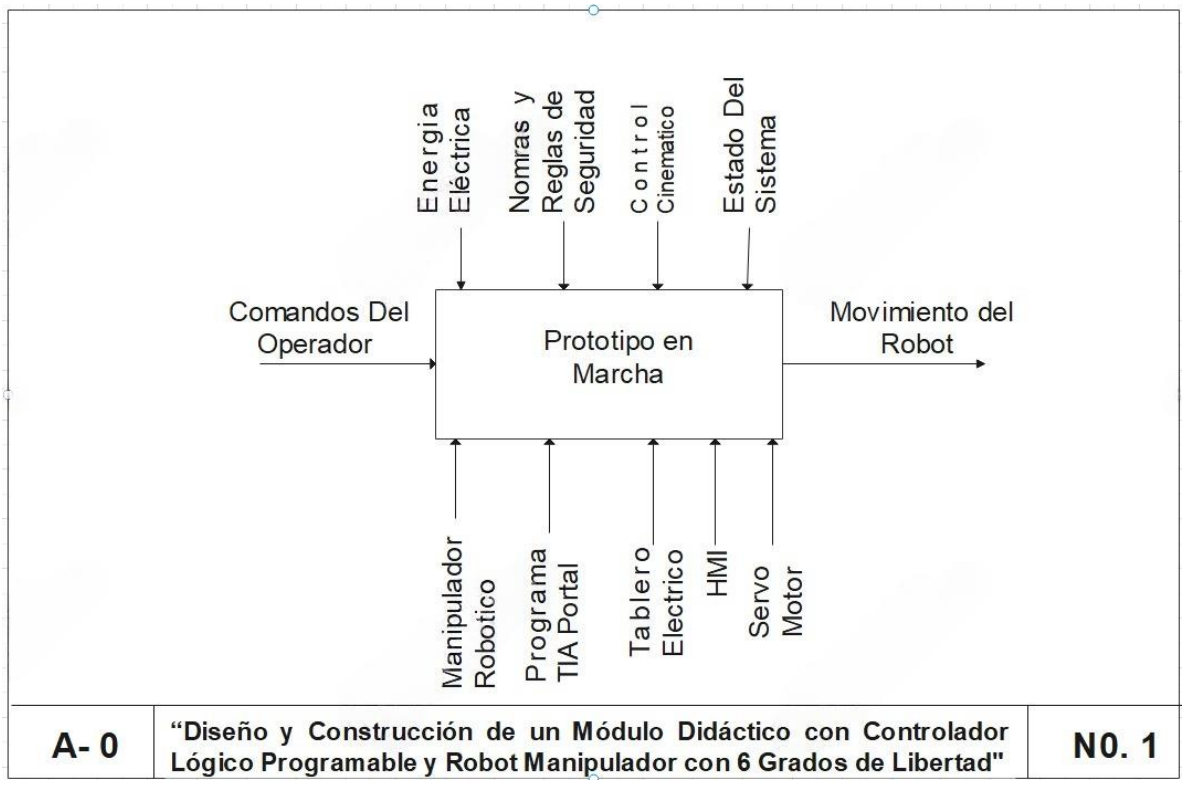


Figura 1 Representación del Diseño conceptual 1

Aquí se encuentra una ampliación de lo que es el prototipo en marcha el cual inicia con la entrada de comandos del operador al HMI, con mecanismo y el software mandar comandos al PLC, el cual ahí se hará todo el control cinemático y por coordenadas por medio del programa para PLC seleccionado, finalmente se mandara una señales de control a los Servomotores del robot para que realice los movimientos o tareas.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 265 - 287.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

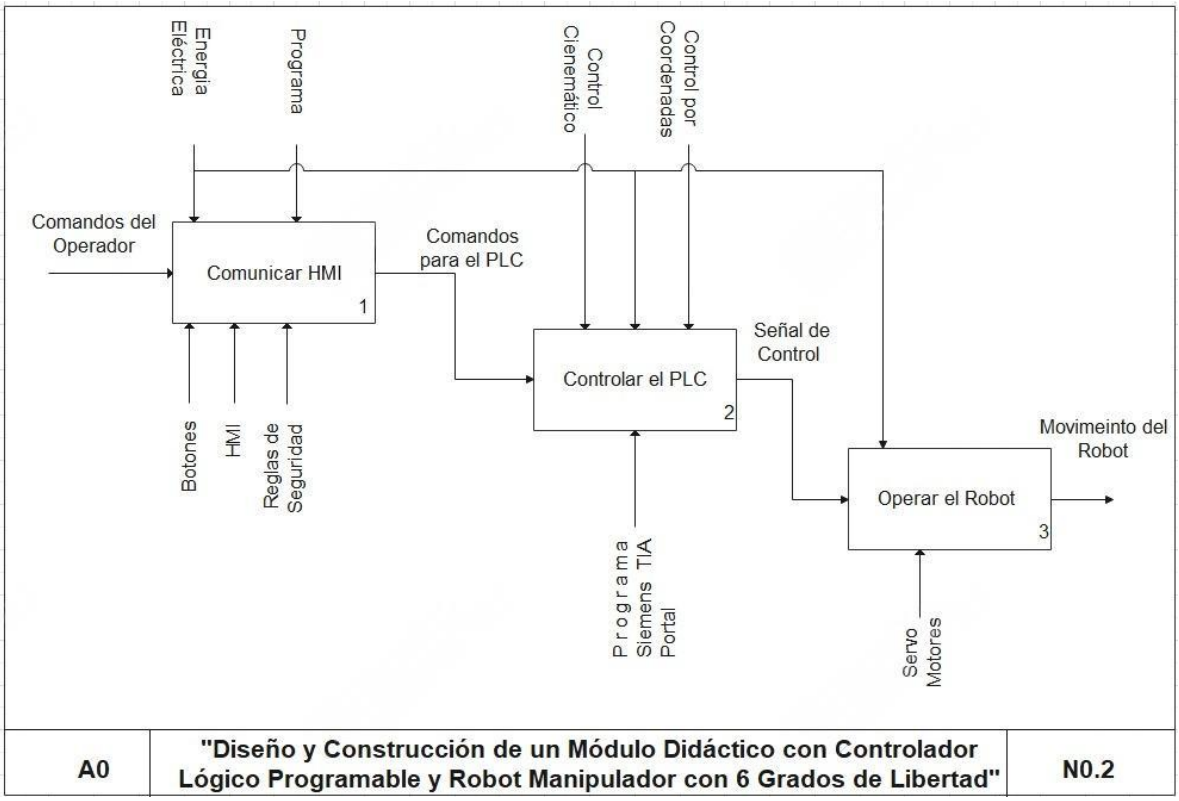


Figura 2 Representación del Diseño conceptual 1

2.1. Identificación de necesidades

En la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas del IPN, la práctica en los laboratorios es esencial para la carrera de mecatrónica, ya que permite aplicar el conocimiento teórico adquirido en clase. Los proyectos prácticos permiten a los estudiantes integrar diversas materias, como control, circuitos eléctricos, PLC, mecánica y electrónica de potencia. Un ejemplo destacado es el trabajo con robots. Actualmente, la UPIIZ cuenta con un robot KUKA KR5 sixx R850. Sin embargo, su alto costo y complejidad de uso representan un desafío significativo para su implementación en prácticas regulares.

En la Tabla 1 se describen especificaciones de diseño a partir de listas de necesidades donde el valor 5 representa menor importancia y 1 mayor importancia.

Número	Necesidad	Especificación de diseño	Importancia
1	Diseño y construcción de estructura mecánica	La estructura debe permitir movimientos libres de un robot de 6 GDL, con un área de trabajo de 1 m³	**1**
2	Control retroalimentado para cada articulación	Implementar controladores de posición y velocidad en cada articulación	**1**

3	Sistema de alimentación eléctrica y electrónica	Diseñar un sistema de alimentación que soporte todos los componentes eléctricos y electrónicos	**2**
4	Interfaz HMI para programación y monitoreo	Desarrollar una interfaz fácil de usar que permita al usuario programar y monitorear el robot	**2**
5	Integración del PLC con el robot y los sistemas eléctricos	Acondicionar señales para garantizar comunicación eficiente entre el PLC y el robot	**1**
6	Seguridad del sistema	Incluir mecanismos de parada de emergencia y protección para evitar daños al equipo y los usuarios	**1**
7	Facilidad de mantenimiento	Diseñar el sistema para facilitar el acceso y mantenimiento de los componentes	**3**
8	Materiales de costo accesible	Seleccionar materiales que ofrezcan durabilidad y un costo accesible, acorde al presupuesto otorgado para el proyecto	**4**
9	Documentación técnica para uso didáctico	Incluir guías y documentación para facilitar el aprendizaje en el laboratorio	**3**
10	Compatibilidad con futuras expansiones	Dejar abiertas opciones para añadir otros módulos o mejoras al sistema	**2**
11	Tamaño compacto y facilidad de instalación en el laboratorio	El sistema debe ocupar poco espacio (solo el necesario y definido como espacio de trabajo) y ser fácil de instalar	**4**
12	Cumplimiento de normativas de seguridad y calidad	Cumplir con las normativas industriales aplicables para sistemas automatizados	**1**
13	Control de precisión y repetibilidad	Garantizar una alta precisión y repetibilidad en los movimientos del robot	**1**

Tabla 1 Tabla de Identificación de necesidades

2.2. Identificación de métricas

Las métricas están estrechamente relacionadas y deben analizarse en conjunto para obtener una imagen completa y precisa del rendimiento del sistema. A continuación, en la Tabla 2 se muestran las métricas establecidas.

Necesidad	Métrica de Evaluación	Importancia	Unidades
1	Precisión en la posición final de la herramienta del robot	1	Milímetros (mm)
2	Tiempo de respuesta de cada articulación	1	Segundos (s)
3	Capacidad máxima de corriente y voltaje del sistema	2	Amperios (A) Voltios(V)

4	Tiempo de aprendizaje del usuario para manipular la HMI	2	Horas (h)
5	Latencia en la transmisión de señales entre el PLC y el robot	1	Milisegundos (ms)
6	Número de sistemas de protección implementados	1	Unidades de sistemas de seguridad
7	Tiempo promedio de mantenimiento	3	Horas (h)
8	Costo total del sistema	4	Pesos ($)
9	Nivel de comprensión de la documentación por los usuarios	3	Porcentaje (%)
10	Número de puertos o interfaces adicionales disponibles	2	Unidades de Expansión
11	Dimensiones máximas del sistema	4	Metros Cúbicos (m3)
12	Cumplimiento con normativas específicas	1	Certificaciones o Aprobaciones
13	Desviación estándar de la repetibilidad de movimientos	1	Milímetros (mm)

Tabla 1 Lista de métricas

2.3. Valores objetivo ideal y marginalmente aceptable

La tabla de valores objetivo ideales y marginalmente aceptables es una herramienta crucial en el diseño del proyecto, ya que establece un rango de desempeño para cada métrica, ayudando a evaluar si el diseño cumple con los estándares esperados. Los valores objetivo ideales son los niveles deseados de desempeño (óptimos), mientras que los valores marginalmente aceptables representan el límite mínimo de desempeño, por debajo del cual el diseño no sería satisfactorio.

En la Tabla 3 se pueden apreciar dichos valores marginales e ideales para cada una de las métricas de diseño.

Métrica	Valor Objetivo Ideal	Valor Marginalmente Aceptable	Unidad	Descripción
Precisión en la posición final del robot (mm)	**0.5 mm**	**2 mm**	**Milímetros (mm)**	**Idealmente, la precisión del robot debe ser menor a 0.5 mm, pero aún es aceptable si está dentro de los 2 mm.**
Tiempo de respuesta de cada articulación (s)	**0.5 s**	**1 s**	**Segundos (s)**	**Un tiempo de respuesta ideal sería de 0.5 segundos, pero puede ser aceptable hasta 1 segundos.**
Capacidad máxima de	**10 A / 24 V**	**7 A / 12 V**	**Amperios (A) y Voltios (V)**	**El sistema eléctrico debería funcionar con 10A y 24 V de manera**

corriente y voltaje (A y V)				**óptima, pero puede funcionar marginalmente con 7 A y 24V.**
Tiempo de aprendizaje del usuario para la HMI (h)	**1 h**	**5 h**	**Horas (h)**	**El ideal es que el usuario pueda aprender a usar la HMI en una hora, pero un tiempo aceptable sería hasta 5 horas.**
Latencia en la transmisión de señales (ms)	**10 ms**	**50 ms**	**Milisegundos (ms)**	**La latencia ideal para las señales es menor a 10 ms, pero hasta 50 ms es aceptable.**
Número de sistemas de protección implementados	**3 sistemas**	**1 sistema**	**Unidades**	**Se buscan al menos 3 sistemas de protección, pero es aceptable si al menos 1 sistema está presente.**
Tiempo promedio de mantenimiento (h)	**0.5 h**	**2 h**	**Horas (h)**	**El mantenimiento ideal debe ser menor a 30 minutos, pero hasta 2 horas sería tolerable.**
Costo total del sistema (MXM)	**$13,500.00**	**$17,500.00**	**Pesos ($)**	**El costo ideal es de $13,500.00 o menos, pero hasta $17,500.00 sigue siendo aceptable, para asegurar la calidad.**
Nivel de comprensión de la documentación (%)	**90%**	**70%**	**Porcentaje (%)**	**Idealmente, el 90% de los usuarios deberían entender la documentación, pero es aceptable que el 70% lo logre.**
Número de puertos o interfaces adicionales disponibles	**4 puertos**	**2 puertos**	**Unidades**	**Lo ideal es tener 4 puertos de expansión, aunque con 2 sigue siendo viable.**
Dimensiones máximas del sistema (m^3)	**0.7 m^3**	**1.0 m^3**	**Metros cúbicos (m^3)**	**El volumen del sistema idealmente debería ser de 0.7 m^3, pero hasta 1 m^3 es aceptable.**

Cumplimiento de normativas específicas	**100%**	**80%**	**Certificaciones**	**El objetivo es cumplir el 100% de las normativas, pero es aceptable si se cumple al menos el 80%.**
Desviación estándar de la repetibilidad (mm)	**0.1 mm**	**1 mm**	**Milímetros (mm)**	**La repetibilidad ideal es con una desviación estándar menor a 0.1 mm, aunque es tolerable hasta 1 mm.**

Tabla 2 Especificaciones objetivo

2.4. Diseños Conceptuales

Para llevar a cabo la elaboración de las alternativas de posible solución, se ha optado por aplicar una técnica conocida como análisis morfológico. Esta metodología brinda una estructura sólida y sistemática para explorar una amplia gama de alternativas en relación con cada uno de los parámetros o métricas esenciales del proyecto. A continuación, se muestra el análisis morfológico llevado a cabo en la Tabla 4.

Área	DC1	DC2	DC3
Mecanismos	Brazo robótico con eslabones articulados	Sistema cartesiano (XYZ) con actuadores lineales	Brazo Robótico Modular Tipo SCARA
Materiales	Plásticos industriales (ABS, PLA, PETG)	Aluminio Ligero	Acero Inoxidable
Tipo de actuadores	Motores paso a paso	Actuadores neumáticos	Motores DC con reductores
Estructura del chasis	Estructura de Perfiles de Aluminio	Soportes con rieles deslizantes	Chasis de acero estructurado
Componentes	Sensores de posición (encoders)	Giroscopio en cada articulación	Acelerómetros para control de movimiento
Alimentación	Alimentación a red	Baterías recargables	Paneles Solares
Sistema de transmisión	Engranajes cónicos	Bandas dentadas	Tornillo sin fin
Interfaz (HMI)	Pantalla táctil	Software en PC con interfaz gráfica	Aplicación móvil para control remoto
Método de programación	Programación textual en ROS	HMI con botones físicos	Lenguaje de programación Visual (tipo Blockly)

	(Robot Operating System)		
Monitorización	Indicadores LED y pantallas numéricas	Sistemas de alertas y gráficas en tiempo real	Sistema de retroalimentación háptica
Control/Automatización	PLC con UART para control general	PLC con Modbus y control de movimiento	Microcontrolador con sistema embebido
Protocolo de comunicación	Serial	Modbus	Ethernet/IP
Sistema de retroalimentación	Encoders para control de posición	Sensores de proximidad	Sensores de presión

Tabla 3 Caja Morfológica

Una vez completado el proceso creativo, se identificaron una serie de alternativas valiosas para conseguir la solución adecuada al problema identificado. Estas alternativas representan un conjunto diverso de enfoques y estrategias que tienen el potencial de abordar de manera efectiva las necesidades y requisitos del proyecto. A continuación, se detallan tres de estas alternativas clave que son consideradas adecuadas, con la intención de someterlas a un análisis más profundo y una evaluación antes de tomar una decisión final.

2.4.1. Diseño conceptual 1

Este diseño conceptual de módulo didáctico incluye un brazo robótico de 6 grados de libertad controlado con motores paso a paso y una estructura de aluminio con piezas de plástico industrial. Utiliza engranajes cónicos y encoders para movimientos precisos. El control se gestiona mediante un PLC con comunicación UART, y el software basado en ROS permite programar y controlar trayectorias. La interacción se realiza a través de una pantalla táctil HMI, con retroalimentación visual por LED y pantallas numéricas. El sistema se alimenta por conexión directa a la red, permitiendo operación continua.

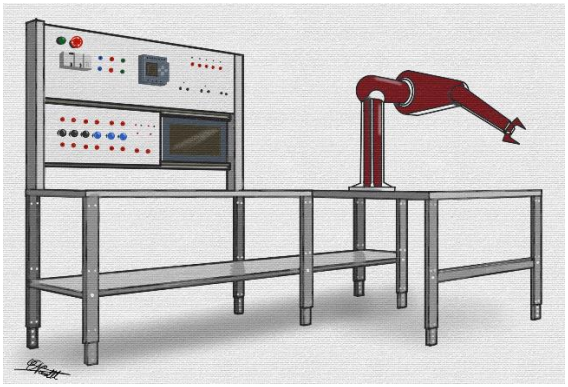


Figura 3 Representación del Diseño conceptual 1

2.4.2. Diseño conceptual 2

Este segundo diseño conceptual incluye un sistema cartesiano (XYZ) con actuadores lineales y estructura de aluminio ligero, controlado mediante bandas dentadas para alta precisión. Actuadores neumáticos permiten movimientos rápidos, y giroscopios en las articulaciones aseguran estabilidad. Un PLC con protocolo Modbus coordina los movimientos y sensores de proximidad. Funciona con baterías recargables, ofreciendo movilidad. La interacción se realiza mediante una HMI con botones físicos y un software en PC, que permite monitorear el sistema en tiempo real, visualizar alertas y gráficas operativas. La comunicación se gestiona vía Modbus.

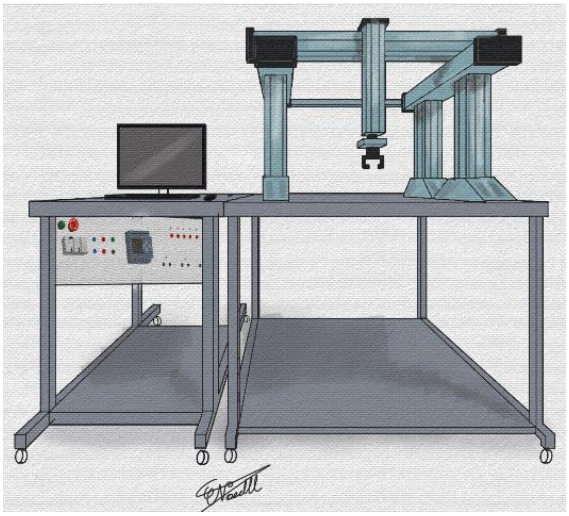


Figura 4 Representación del Diseño conceptual 2

2.4.3. Diseño conceptual 3

Este tercer diseño conceptual se basa en un brazo robótico modular tipo SCARA para movimientos rápidos y precisos en el plano horizontal. Su estructura es de acero inoxidable con un chasis de acero estructurado. Los motores DC con reductores, junto a un tornillo sin fin, controlan los movimientos con precisión. Acelerómetros ajustan los movimientos en tiempo real, y paneles solares proporcionan energía autónoma. El control se realiza mediante una aplicación móvil y un lenguaje visual tipo Blockly, complementado con retroalimentación háptica. Un microcontrolador con Ethernet/IP gestiona el sistema, y los sensores de presión previenen sobrecargas.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 265 - 287.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

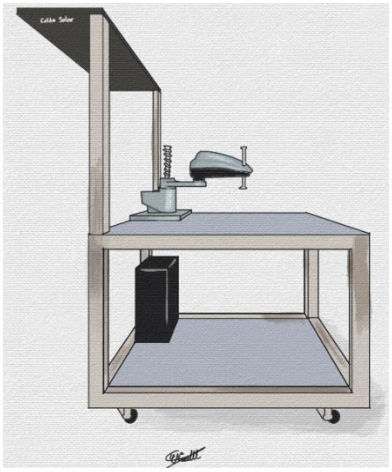


Figura 5 Representación del Diseño conceptual 3

2.5. Selección de la solución adecuada

Se llevó a cabo un análisis detallado de los diseños conceptuales utilizando tablas de pertenencia y selección, con el fin de identificar la solución que mejor aborda el problema principal.

2.5.1. Tabla de pertenencia

Para realizar una decisión informada se elabora una tabla de pertenencia. Esta tabla se construirá con base en criterios de selección claros, permitiendo una evaluación precisa y objetiva de las opciones disponibles. Al emplear esta herramienta, se establecerá una base firme para tomar la decisión final. A continuación, se presenta en la Tabla 5.

Criterios de Selección	Precisión	Durabilidad	Facilidad de uso	Eficiencia energética	Interfaz	Velocidad de Proceso	Modularidad	Total	Pertenencia
Precisión	°	1	1	1	1	1	1	6	0.286
Durabilidad	0	°	1	1	1	1	1	5	0.238
Facilidad de uso	0	0	°	1	1	0	1	3	0.143
Eficiencia energética	0	1	0	°	0	0	0	1	0.048
Interfaz	0	0	0	1	°	1	1	3	0.143
Velocidad de Proceso	0	0	0	1	0	°	1	2	0.095
Modularidad	0	0	0	1	0	0	°	1	0.048
Total								22	1

Tabla 5 4de pertenencia

Una vez que se determinó la pertenencia de cada uno de los criterios evaluados, se les asignó una ponderación relativa, la cual refleja la importancia de los objetivos en comparación con los demás, tal como se muestra a continuación.

	Ponderación
Excelente	90%
Bueno	75%
Malo	60%

Tabla 6 5 Ponderaciones

Para elegir la mejor opción, se realizó la siguiente tabla de selección tomando en cuenta la pertenencia y el peso de cada criterio.

Criterio	Pertenencia	DC1	DC2	DC3
Precisión	0.286	0.286*0.90=0.2574	0.286*0.75=0.2145	0.286*0.60=0.1716
Durabilidad	0.238	0.238*0.90=0.2142	0.238*0.75=0.1785	0.238*0.60=0.1428
Facilidad de uso	0.143	0.143*0.90=0.1287	0.143*0.75=0.1072	0.143*0.60=0.0858
Eficiencia energética	0.048	0.048*0.90=0.04232	0.048*0.75=0.036	0.048*0.60=0.0288
Interfaz	0.143	0.143*0.90=0.1287	0.143*0.75=0.1072	0.143*0.60=0.0858
Velocidad de Proceso	0.095	0.095*0.90=0.0855	0.095*0.75=0.0712	0.095*0.60=0.057
Modularidad	0.048	0.048*0.90=0.04232	0.048*0.75=0.036	0.048*0.60=0.0288
Total	1	**0.89914**	0.7506	0.6006

Tabla 7 6de Selección

Analizando los resultados de la tabla de selección, se observa que el **diseño conceptual 1** obtuvo el mayor puntaje en relación con los objetivos planteados, por lo que se procederá a trabajar el diseño detallado para este diseño conceptual.

2.3 Diseño detallado

Actualmente se cuenta con un tablero electrónico el cual se muestra en la figura 11 , por lo que cuenta con fuente de alimentación para proporcionar alimentación al PLC y otros componentes, tiene entradas digitales como módulos que reciben señales de los sensores, interruptores .Así también cuenta con salidas digitales con módulos para actuadores, relés entre otros. Cuenta con cableado para interconectar todos los elementos junto con una pantalla HMI el cual se encargará de la interfaz de Hombre-Máquina.

Si bien el tablero electrónico no concuerda con el diseño conceptual 1 el cual es el seleccionará para el proyecto, por lo que se decide restructurarlo para que pueda ser

utilizado en el proyecto de manera que se utilice todos los componentes y estructuras que cuenta.

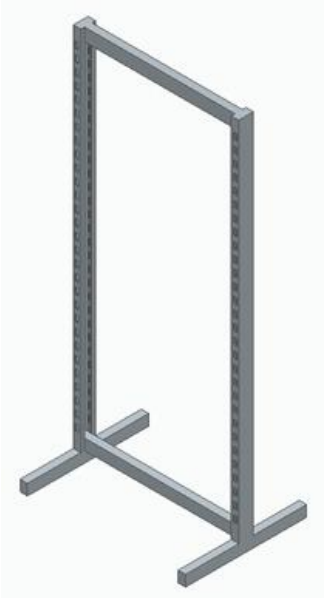


Figura 6 Modelo de estructura parte 1

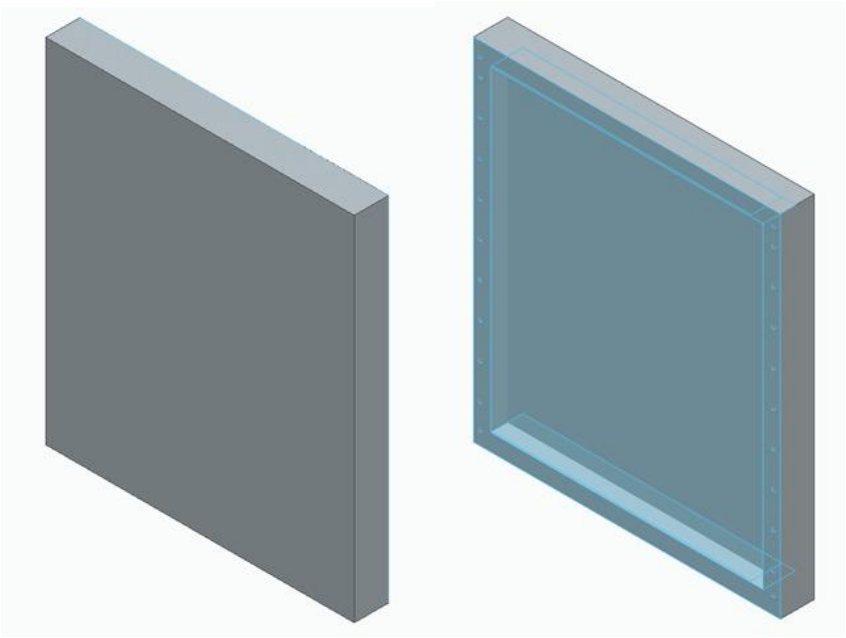


Figura 6 Modelo de la estructura parte 2.

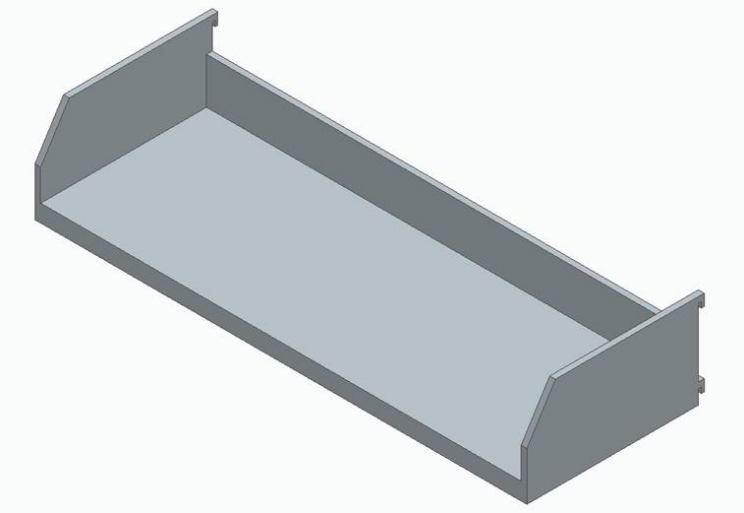


Figura 7 Modelo de estructura parte 3.

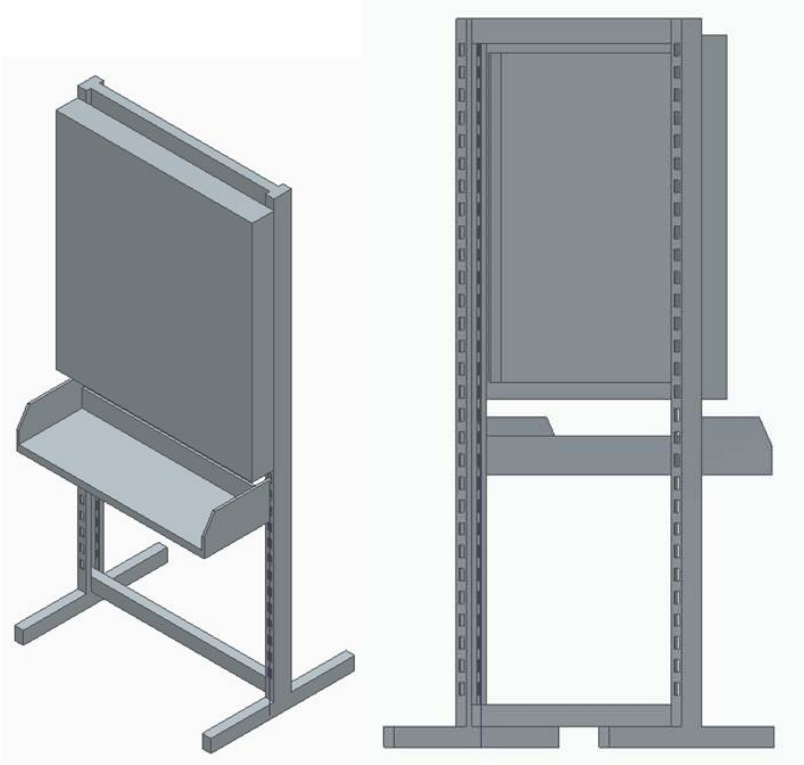
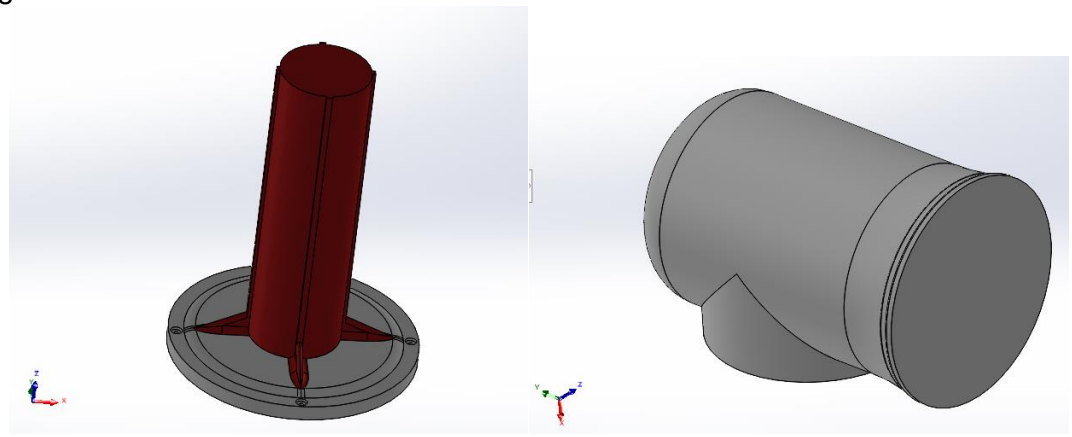


Figura 8 Modelo de estructura ensamblada

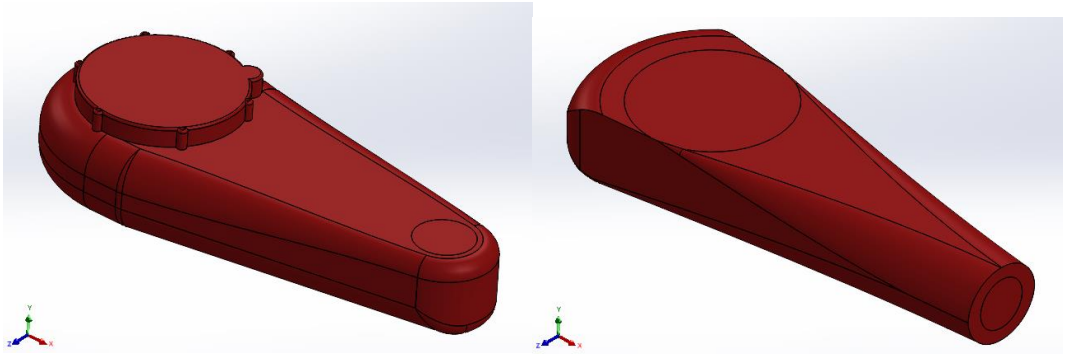
Convergencia Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 265 - 287.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

2.4 Diseño Mecánico

El diseño seleccionado para cada una de la pieza para el robot manipulador de 6 grados de liberta se muestra a continuación.



a) b)



c) d)

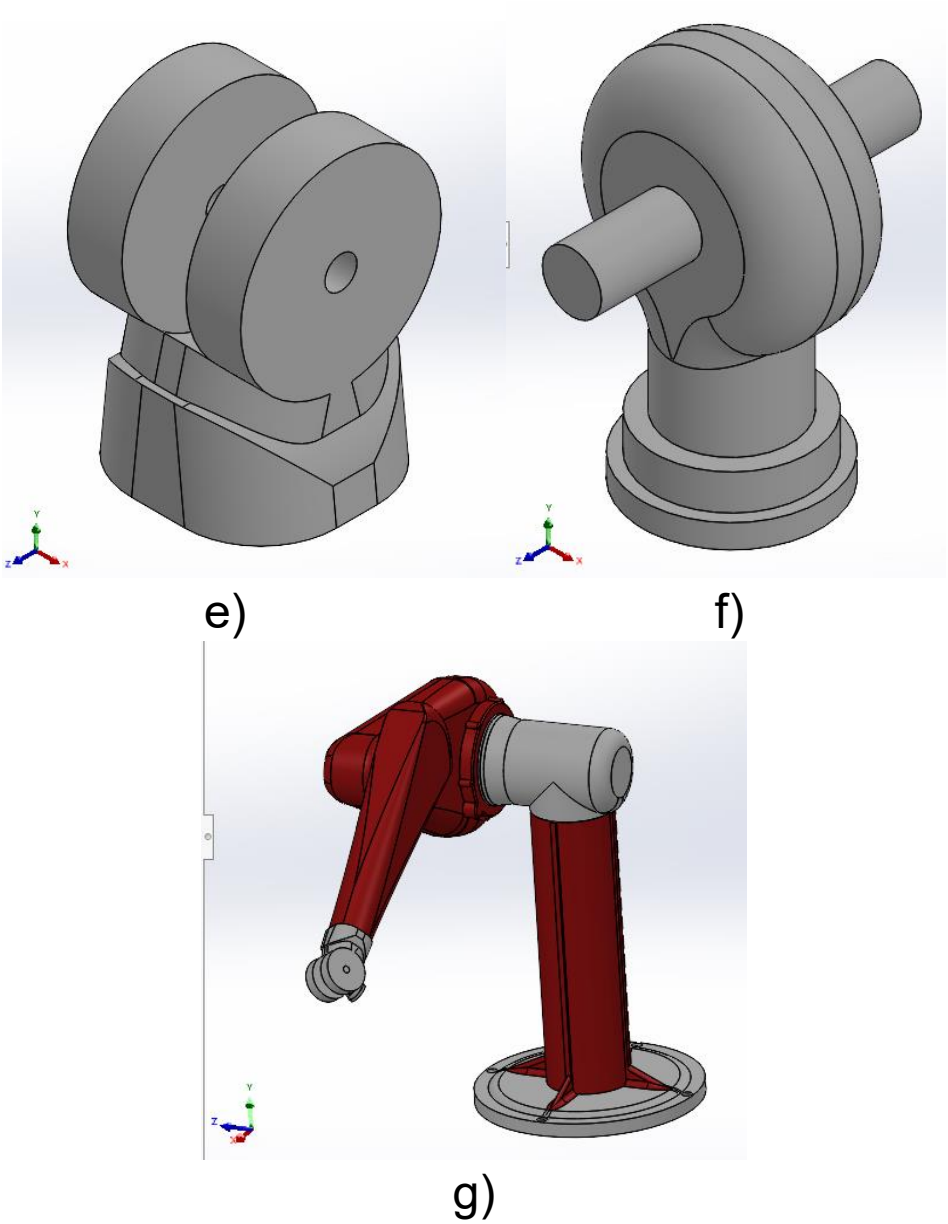


Figura 9 a) Eslabón 0 (inmóvil), b) Eslabón 1, c) Eslabón 2, d) Eslabón 3, e) Eslabón 4 y 5, f) Eslabón 6

3. Resultados

Se espera obtener un prototipo didáctico que integrará un robot de 6 grados de libertad con una estructura robusta y flexible. Este robot será capaz de realizar movimientos precisos en las direcciones especificadas. Además, el robot estará automatizado con un controlador PLC, lo que permitirá un control eficiente y en tiempo real de las articulaciones del robot.

En cuanto a la programación y control, se desarrollarán rutinas predefinidas para movimientos demostrativos del robot. Sin embargo, la característica de arquitectura abierta permitirá que el prototipo pueda ser programado según las necesidades del usuario, ofreciendo una gran versatilidad para diferentes aplicaciones.

Una vez diseñado y desarrollado, el robot será sometido a pruebas rigurosas para validar su funcionamiento y rendimiento, asegurando que opere según lo previsto y sin problemas. En términos de seguridad, el robot cumplirá con todas las normas de seguridad pertinentes para garantizar un entorno de trabajo seguro.

Además, se desarrollará una HMI que permitirá monitorear la actividad del robot, así como un sistema de paro de emergencia para detener el robot en caso de situaciones peligrosas. Este prototipo no solo será una herramienta educativa útil para los estudiantes, dándoles experiencia práctica en robótica, control y automatización, sino que también permitirá explorar e implementar mejoras continuas. Además, se podrá adaptar a las nuevas tecnologías y a las necesidades educativas que vayan surgiendo.

Figura 10 a) Armado completo

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 265 - 287.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Figura 11 a) Armado completo del tablero, el cual se va restructurar para el diseño seleccionado

3.1 Simulación

Se realiza una simulación del movimiento de un brazo robótico de 6 grados de libertad en el software de Matlab . El cual en el permite ajustar los parámetros de las articulaciones a través de una interfaz grafía y actualiza la posición del robot en una vista 3D

De acuerda con la talba 8 Se define las longitudes de los eslabones del robot (l1, l2, l3 etc.). Se establecen los valores iniciales de las articulaciones (q1, q2, q3 , etc.), teniendo estos valores se creó una tabla con los parámetros D-H que incluyen los ángulos (th), las distancias (d), las longitudes de los eslabones (a) y los ángulos de torsión (alpha). Se generan las matrices de transformación homogéneas para cada eslabón, en un bucle, utilizando la fórmula de D-H. Esto se hace creando una matriz 4X4 para cada articulación, se calculan las matrices de transformación acumuladas desde la base hasta el extremo del efector (T1,T2 ..., T6).

Eslabón	θ_i (Inicial)	a_i	α_i	d_i
1	90	0	0	d_1
2	0	a_2	0	0
3	-90	a_3	-90	0
4	0	a_4	90	0
5	90	0	+90	d_5
6	0	a_6	0	0

Tabla 8 Tabla de parámetros de Denavit-Hartenberg

th: Ángulos de articulación ajustados por desplazamientos (en radianes).

d: Distancias a lo largo del eje z para cada articulación.

a: Longitudes a lo largo del eje x para cada eslabón.

alpha: Ángulos de torsión de cada eslabón respecto al eje x (en radianes).

Simulación Inicial

Se utilizan un sistema de coordenadas en 3D donde el eje X, Y y Z están definíos. Para iniciar la visualización del robot de 6 grados de libertad se colocan los valores iniciales para cada articulación, se configura la figura 3D donde se dibuja el brazo robótico, cada segmento se dibuja usando líneas de distintos colores que conectan las posiciones de los eslabones como se muestra en la figura 12.

% Valores iniciales para las articulaciones o grados de libertad (en grados)

q1=(0*2*pi) /360;

q2=(0*2*pi) /360;

q3=(0*2*pi)/360;

q4=(0*2*pi) /360;

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 265 - 287.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

q5=0;

q6=(0*2*pi) /360;

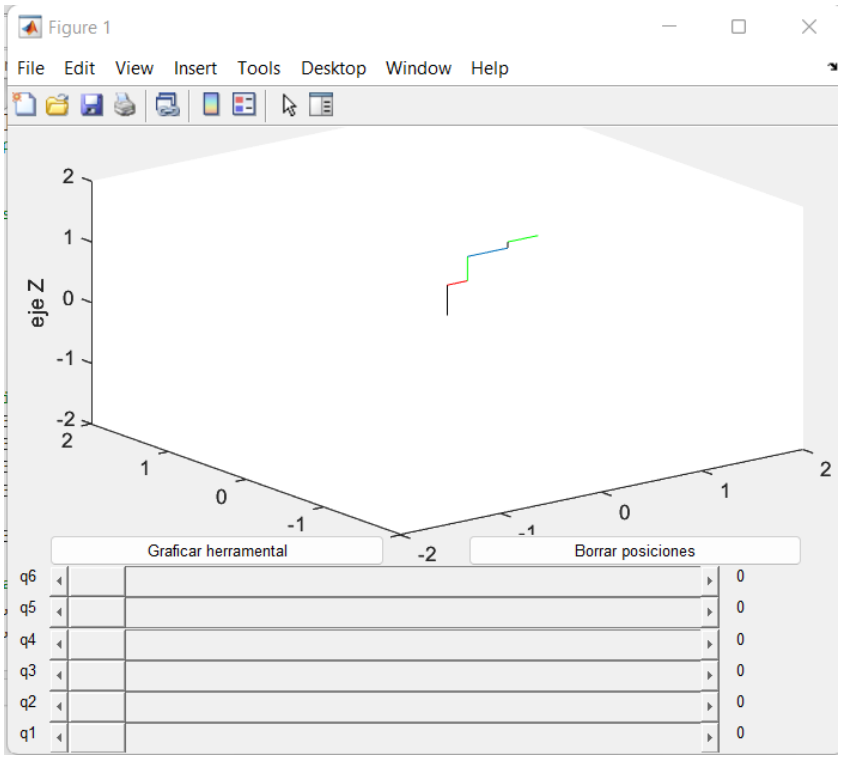


Figura 12 Simulación en Matlab del robot de 6 grados de libertad con posiciones iniciales.

Se modifican los valores de las posiciones de cada articulación del robot con controles de deslizantes que permitan al usuario modificar los ángulos de lar articulaciones en tiempo real. Cada vez que se mueve unas sliders ser recalculan las matrices de transformación y se redibuja el brazo robótico como se muestra en la figura 13.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 265 - 287.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

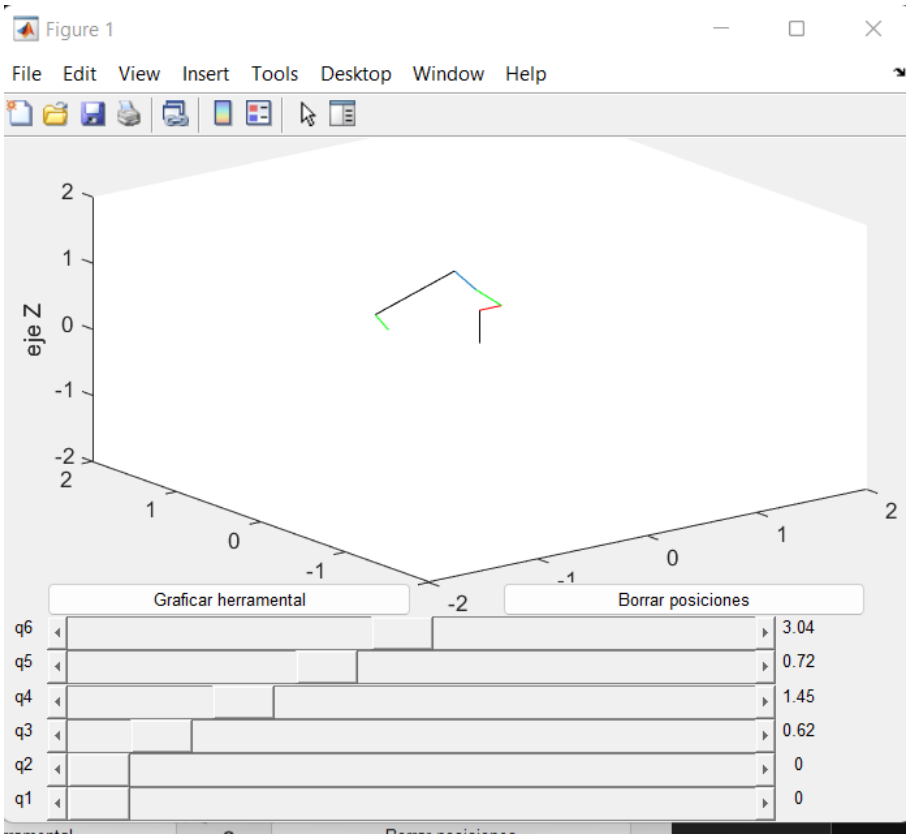


Figura 13 Simulación en Matlab del robot de 6 grados de libertad modificando las posiciones finales

En la figura 14 se muestra un análisis estático de tensiones en el modelo de robot seleccionado bajo una carga de 10 kg (máxima propuesta para las piezas a manipular) aplicada en la punta del brazo (Posición donde se localiza el efector final). La mayor parte de la estructura está en zonas de baja tensión (color azul), lo que indica que el material está dentro de límites seguros. Las tensiones más altas, aunque presentes cerca de las articulaciones y la base, no superan el límite elástico del material (5.000e+07 N/m²). La deformación está amplificada para su visibilidad, pero en realidad es insignificante, mostrando que el robot puede soportar la carga sin riesgo estructural.

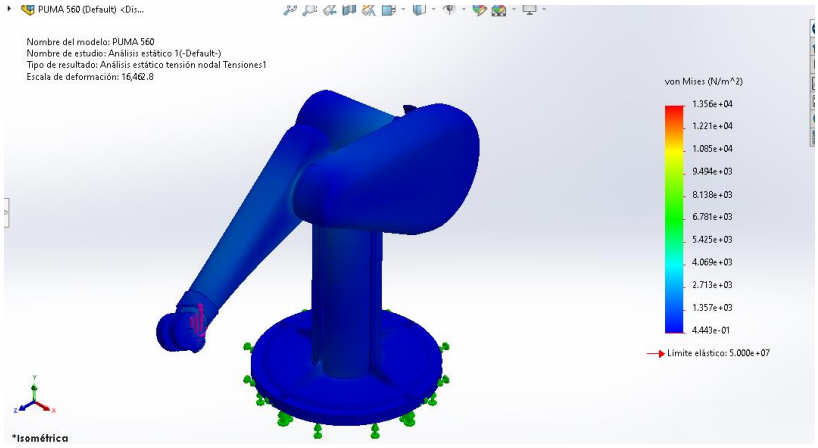


Figura 14 Análisis estático de Tensión con una Carga aproximada de 10 Kg

La figura 15 muestra un análisis estático de desplazamientos en el robot bajo una carga de 10 kg. La escala de color representa los desplazamientos en milímetros (URES), donde las mayores deformaciones se encuentran en la punta del brazo (en rojo), con un desplazamiento máximo de aproximadamente 6.159e-03 mm. La base y el cuerpo del robot presentan desplazamientos mínimos (en azul), lo que indica que la mayor deformación ocurre en el extremo que soporta la carga, mientras que el resto de la estructura se mantiene estable y dentro de rangos seguros.

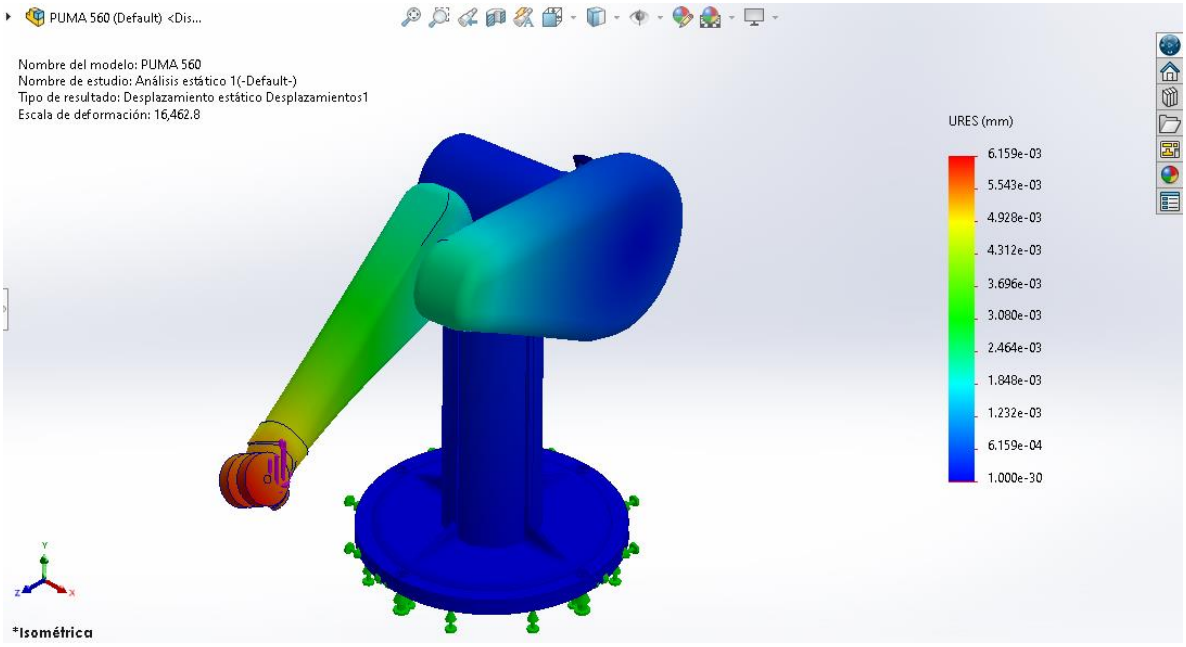


Figura 15 Análisis estático de desplazamientos con una Carga aproximada de 10 Kg

La Figura 16 muestra un análisis estático de deformación unitaria en el robot bajo una carga de 10 kg. La escala de color (ESTRN) indica las deformaciones unitarias, con valores que van desde 2.308e-10 hasta 2.910e-06. La mayor deformación ocurre nuevamente en la punta del brazo (color amarillo/rojo), mientras que la base y el cuerpo principal presentan valores muy bajos de deformación (azul), indicando que la estructura se deforma mínimamente bajo la carga aplicada. La deformación es más notable en el brazo extendido, donde se concentra la fuerza aplicada.

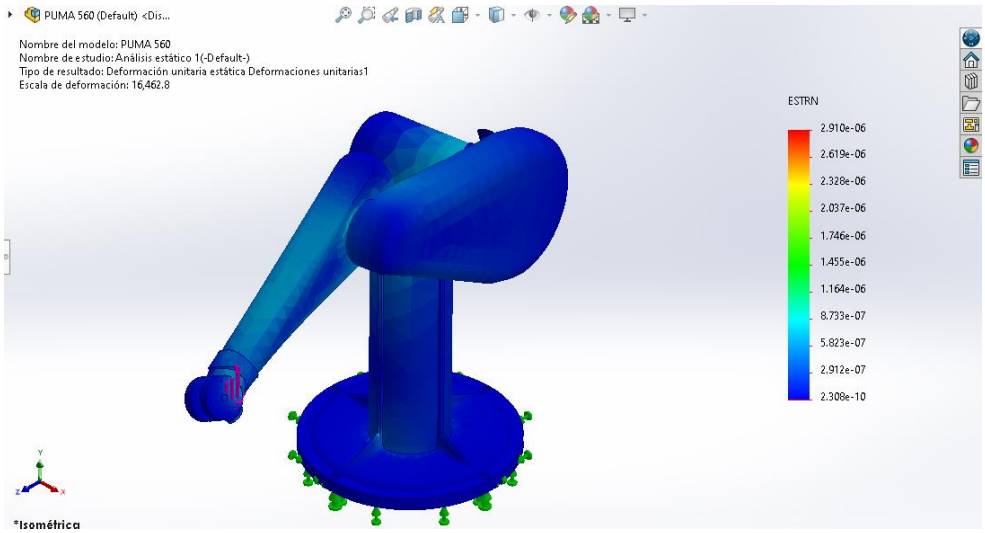


Figura 16 Análisis estático de deformación unitaria con una Carga aproximada de 10 Kg

4. Conclusión

Con la conclusión del proyecto, se espera obtener un prototipo didáctico que integrara un robot de 6 grados de libertad con una estructura robusta y flexible. Este robot será capaz de realizar movimientos precisos en las direcciones especificadas. Además, el robot estará automatizado con un controlador PLC, lo que permitirá un control eficiente y en tiempo real de las articulaciones del robot.

En cuanto a la programación y control, se desarrollarán rutinas predefinidas para movimientos demostrativos del robot. Sin embargo, la característica de arquitectura abierta permitirá que el prototipo pueda ser programado según las necesidades del usuario, ofreciendo una gran versatilidad para diferentes aplicaciones. Una vez diseñado y desarrollado, el robot será sometido a pruebas rigurosas para validar su funcionamiento y rendimiento, asegurando que opere según lo previsto y sin problemas. En términos de seguridad, el robot cumplirá con todas las normas de seguridad pertinentes para garantizar un entorno de trabajo seguro. Además, se desarrollará una HMI que permitirá monitorear la actividad del robot, así como un sistema de paro de emergencia para detener el robot en caso de situaciones peligrosas. Este prototipo no solo será una herramienta educativa sumamente útil para los estudiantes, dándoles experiencia práctica en robótica, control y automatización, sino que también permitirá explorar e implementar mejoras continuas.

Referencias

[1] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, Robot Modeling and Control. John Wiley & Sons, 2006.
[2] J. J. Craig, Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Pearson Prentice Hall, 2005.
[3] K. J. Åström and R. M. Murray, Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton University Press, 2010.
[4] W. Bolton, Programmable Logic Controllers. Newnes, 2015.
[5] M. Zapata, L. Topón-Visarrea, and E. Tipán, Fundamentos de Automatización y Redes Industriales. Clarendon Press, 2021.
[6] E. A. Parr, Programmable Controllers. Elsevier, 2011.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 20, pp. 288 - 303.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Dispositivo para la Monitorización de Salud Mental con Sensores de Bajo Costo

Mendoza Belmontes Mariana Lizeth[1], Vázquez Reyes Sodel[1], Guerrero Osuna Héctor Alonso[1], Velasco Elizondo Perla[2], Rodríguez Ruíz Julieta[2] y Martínez Blanco Ma. Del Rosario[1]

[1]Posgrado en Ingeniería y Tecnología Aplicada, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México
[2]Ingeniería de Software, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México
34152002@uaz.edu.mx

Resumen

El interés en los problemas de salud mental ha aumentado debido a su impacto global y económico significativo. Tradicionalmente, el monitoreo se basa en entrevistas clínicas, lo que puede resultar inexacto dependiendo solamente de la autoperspectiva del paciente. Los dispositivos vestibles, ofrecen una solución moderna, permitiendo la recopilación de datos en tiempo real en entornos cotidianos. Estos dispositivos pueden capturar diversos parámetros biométricos, mejorando la precisión en el monitoreo y facilitando una mejor atención remota. Este trabajo desarrolla un dispositivo para la monitorización de salud mental con sensores de bajo costo con conectividad a internet de las cosas para facilitar el monitoreo remoto y continuo para obtener datos fisiológicos y del movimiento que ayude a buscar patrones de comportamiento asociados a problemas de salud mental.

Palabras clave: salud mental, dispositivo, sensores de bajo costo, internet de las cosas, monitoreo remoto, datos fisiológicos, datos del movimiento.

1. Introducción

Recientemente, hay un aumento en el interés hacia la salud mental debido a que los trastornos mentales siguen siendo una de las diez principales causas de carga de enfermedades a nivel global [1]. Un informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS) indica que cerca de mil millones de personas, lo que equivale al 12,5% de la población mundial, padecen algún tipo de enfermedad mental [2]. La enfermedad mental es un estado de salud que altera los pensamientos, emociones y acciones de un individuo afectando su capacidad de llevar a cabo sus actividades diarias [3], [4]. Se estima que el gasto total en atención médica relacionada con la salud mental alcanzará los 16.3 billones de dólares estadounidenses para el año 2030 a nivel mundial, excediendo el costo del cáncer y diabetes [5], [6]. Para el mismo año, se prevé que habrá una pérdida de productividad de aproximadamente 6 billones de dólares estadounidenses anuales en la economía global debido a problemas de salud mental de los trabajadores [2].

Tradicionalmente, el proceso de monitoreo y diagnóstico en salud mental se basa en entrevistas clínicas, observaciones y autoevaluaciones, lo que puede aumentar el riesgo de diagnósticos incorrectos y tratamientos inadecuados [7]. En las entrevistas clínicas, como la Entrevista Clínica Estructurada para los Trastornos del DSM-5 (SCID), los diagnósticos pueden depender de la percepción personal del paciente, lo que puede llevar a una mala evaluación si no se comunican todos los síntomas. Las observaciones, como las que se realizan en consultas o entornos naturales, pueden no captar con precisión el comportamiento cotidiano del paciente, lo que limita la efectividad del

diagnóstico. Por otro lado, las autoevaluaciones, como la Escala de Depresión de Beck (BDI), dependen del autoconcepto del paciente, lo que puede distorsionar la declaración de los síntomas en el reporte. Estos enfoques tradicionales, aunque son esenciales, pueden ser insuficientes para garantizar un diagnóstico y tratamiento ideal debido a la perspectiva interna [8]. Hoy en día, los dispositivos vestibles ofrecen una notable mejora respecto a los métodos tradicionales para evaluar la salud mental. Estos dispositivos pueden proporcionar resultados más precisos al detectar cambios en aspectos fisiológicos y de comportamiento a lo largo del tiempo, y de forma remota [9] gracias a su capacidad para recopilar datos del individuo en entornos cotidianos en tiempo real [10].

En la última década, se ha producido un aumento significativo en la disponibilidad comercial de dispositivos vestibles para monitorear la salud mental [11]. Estos dispositivos incluyen desde relojes inteligentes, gafas, pulseras, auriculares, joyas, anillos, prendas, hasta textiles electrónicos [12]. Estos dispositivos permiten monitorear constantemente la biometría de una persona de manera no invasiva o, en su defecto, la mínima posible [13]. Los problemas de salud mental suelen manifestarse con respuestas corporales evidentes. Los sensores de los dispositivos pueden capturar datos como la frecuencia cardíaca (FC), la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC), la respuesta galvánica de la piel (GSR), la presión arterial (PA), la temperatura corporal, entre otros parámetros [14]. Estas tecnologías se han utilizado para diversos objetivos, como la detección y el monitoreo de síntomas, la estimación de categorías diagnósticas, la evaluación de la gravedad de la enfermedad, el análisis del riesgo de recaída y la predicción de la respuesta al tratamiento, entre otros [15].

A pesar de los avances en dispositivos vestibles, su elevado costo y poca accesibilidad siguen siendo barreras significativas, especialmente en regiones de bajos recursos y en zonas vulnerables. Además, muchos de los dispositivos disponibles en el mercado están diseñados principalmente para el bienestar general y el fitness, dejando un amplio margen de mejora en áreas como el monitoreo de la salud mental [16], la estabilidad, la sensibilidad, la privacidad de los datos, la eficiencia energética y el costo [17]. Otro punto importante, es la naturaleza de “caja negra” de prácticamente todos los dispositivos de consumo que representa un obstáculo significativo para su integración en el ámbito médico hasta la fecha [18]. Con base a lo anterior, la incorporación del Internet de las Cosas (IoT) en dispositivos vestibles ha abierto nuevas posibilidades para el monitoreo de salud mental, permitiendo el seguimiento continuo de parámetros fisiológicos y del movimiento sin necesidad de la presencia constante del paciente en entornos clínicos. Esto no solo mejora la calidad de los datos recogidos, sino que también puede reducir significativamente los costos asociados al monitoreo tradicional en salud mental [19].

En este trabajo, se propone y se desarrolla un dispositivo de bajo costo para la monitorización de salud mental, equipado con sensores para medir parámetros fisiológicos y del movimiento que serán procesados y transmitidos por un microcontrolador mediante Wi-Fi a la nube en una plataforma IoT para su almacenamiento y visualización en tiempo real desde cualquier tecnología inteligente con conexión a internet. De manera que, las contribuciones de este trabajo son las siguientes:

- Un dispositivo para la monitorización de salud mental con sensores de bajo costo accesible para los pacientes más vulnerables y para los profesionales médicos e investigadores que desean llevar a cabo aplicaciones e investigaciones a gran escala.
- La integración del sensor ICM-20948 que integra en un solo chip tres tipos de sensores: acelerómetro, giroscopio y magnetómetro, que abarca un rango más amplio de recolección de datos del movimiento.
- La obtención de señales simultáneas: frecuencia cardiaca, saturación de oxígeno, aceleración lineal, velocidad angular y orientación, que proporcionan información de la relación entre los datos fisiológicos y del movimiento. Donde posteriormente se permitiría la correlación de estos datos para encontrar patrones asociados a los problemas de salud mental.

Este documento está organizado de la siguiente manera: en la sección dos se revisan y analizan los dispositivos más usados en estudios de salud mental, las señales más relevantes para el seguimiento de esta área y trabajos relacionados. En la sección tres se muestra la arquitectura,

desarrollo y descripción del sistema propuesto. En la sección cuatro se presentan los resultados obtenidos al desarrollo y prueba del sistema y, por último, en la sección cinco se muestran las conclusiones generales de este trabajo, así como el trabajo a futuro.

2. Trabajos relacionados

En la literatura, numerosos estudios han investigado el uso de dispositivos vestibles para el monitoreo de la salud mental. Una revisión sistemática [20] analizó 69 artículos que aplicaban tecnología vestible con inteligencia artificial para detectar y diagnosticar condiciones como ansiedad y depresión. El 90% de los estudios revisados utilizaron dispositivos comerciales, siendo los más frecuentes el Actiwatch AW4 (25%), seguido por la serie Fitbit (19%) con modelos como Fitbit Charge, Fitbit Flex y Fitbit Altra, y la serie Empatica (10%) con modelos E3 y E4. El sensor más común en estos dispositivos fue el acelerómetro (ACC) (91%), seguido por los sensores de fotopletismografía (PPG) (45%). Otra revisión similar [21], que incluyó 58 estudios, identificó a Fitbit (16%) como el fabricante más utilizado, seguido por Actiwatch y Empatica (12%). Ambos estudios destacaron que la mayoría de los dispositivos eran del tipo pulsera, lo que subraya la preferencia por dispositivos cómodos y fáciles de llevar. Sin embargo, un análisis más extenso de 115 artículos [22] sobre dispositivos de Apple Watch (siendo las Series 8 y Ultra los modelos más usados en salud mental [23]) demostró preocupaciones sobre la viabilidad económica de estas tecnologías en contextos de atención médica a gran escala, lo que indica la necesidad de desarrollar dispositivos de bajo costo para permitir estudios más accesibles en la salud mental.

En la Tabla 1 se describen las especificaciones de algunos de los dispositivos antes mencionados. La mayoría de los dispositivos cuentan con algoritmos integrados ya que son dispositivos dirigidos a la salud en general y al fitness, lo que implica que no existe la posibilidad de extraer datos crudos para un posterior procesamiento, además de que no especifican qué tipo de algoritmo usan para analizar los datos recolectados. A excepción del dispositivo Empatica, que es una marca que se usa ampliamente en la investigación médica debido a que permite la obtención de datos sin procesar para que se pueda llevar a cabo un análisis posterior, lo que lo hace especialmente útil en investigaciones científicas.

Tabla 1. Dispositivos vestibles usados para el monitoreo de la salud mental

Dispositivo	Sensores	Transmisión de datos	Plataforma de visualización de datos	Algoritmos Integrados	Precio (MXN)
Empatica E4 [24]	Sensor de actividad electrodermal (EDA), sensor de frecuencia cardíaca, acelerómetro de 3 ejes, sensor de temperatura de piel	Bluetooth	Plataforma Empatica Cloud	No	$34,000
Fitbit Flex 2 [25]	Acelerómetro de 3 ejes	Bluetooth	Aplicación móvil de Fitbit	Sí	$1,200
Apple Watch Series 8 [26]	Sensor de frecuencia cardiaca (PPG y ECG), sensor de oxigenación en la sangre, acelerómetro y giroscopio de 3 ejes, altímetro, GPS, temperatura	Bluetooth, Wi-Fi	App Salud en iPhone, App de Actividad	Sí	$6,800
Fitbit Charge 5 [27]	Sensor de frecuencia cardíaca (PPG), sensor de saturación de oxígeno, acelerómetro de 3 ejes, GPS	Bluetooth	Aplicación móvil de Fitbit	Sí	$3,500

Además de identificar los dispositivos vestibles más utilizados en el monitoreo de la salud mental, es importante destacar los diferentes tipos de señales biométricas empleadas en la detección y seguimiento de la salud. Un análisis [28] de 25 estudios sobre diversos problemas de salud mental monitoreados con tecnología vestible concluyó que la variabilidad de la frecuencia cardíaca, la electroencefalografía, la respuesta galvánica de la piel y la temperatura de la piel son las señales más distintivas para detectar condiciones de salud mental. Otros investigadores [29] añaden la electrocardiografía, la electromiografía y la PPG como señales importantes para el monitoreo y detección de problemas de salud mental como el estrés. Esto muestra que la combinación de varios tipos de señales fisiológicas puede mejorar la precisión de los sistemas de monitoreo.

En [30], se desarrolló un dispositivo vestible con sensores como IMU 6DoF, sensor de temperatura y micrófonos MEMS, cuyos datos se almacenan en una memoria SD para su análisis. Sin embargo, el dispositivo carece de transmisión de datos en tiempo real, lo que impide el monitoreo en tiempo real. En [31] hay transferencia de datos de un sensor de PPG de bajo costo por medio de Bluetooth utilizando Arduino para detectar el estrés, no obstante, este sistema no utiliza una transmisión de datos a la nube para el monitoreo en tiempo real desde ubicaciones remotas. La tecnología IoT tiene el potencial de abarcar estas limitaciones al ofrecer la recepción y visualización de datos en tiempo real desde cualquier lugar permitiendo un monitoreo continuo y remoto.

3. Sistema propuesto

3.1 Arquitectura del sistema

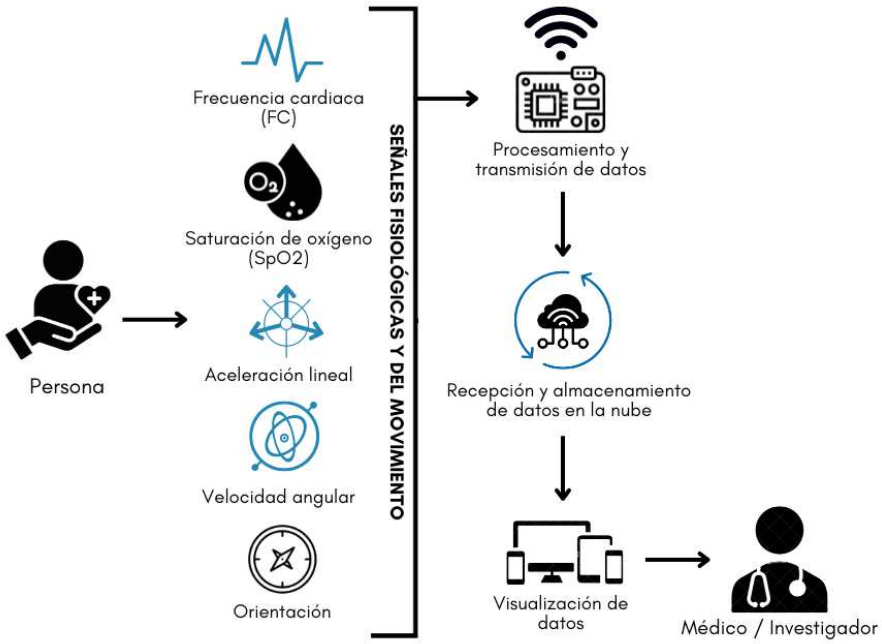


Figura 1. Arquitectura del sistema del dispositivo para la monitorización de la salud mental con sensores de bajo costo.

La arquitectura del dispositivo se describe en la Figura 1. El sistema comienza en el monitoreo de una persona recolectando diversos tipos de señales fisiológicas y de movimiento. Específicamente, mide la frecuencia cardiaca para registrar el ritmo cardíaco, la saturación de oxígeno para evaluar los niveles de oxigenación en la sangre, la aceleración lineal para captar cambios de aceleración, la velocidad angular para detectar la rapidez de los giros y la orientación. Los datos recopilados son procesados por un microcontrolador que los transmite de manera inalámbrica mediante Wi-Fi a la nube. En la nube, los datos se almacenan en una plataforma IoT y son accesibles para su posterior análisis con la posibilidad de descargarlos en formato .csv para procesarlos. Estos datos también se visualizan a través de un panel de control accesible proporcionado por la plataforma, el cual puede consultarse desde dispositivos como computadoras, teléfonos o tabletas con conexión a internet. Finalmente, un profesional de la salud o un investigador puede acceder a los datos en tiempo real para llevar a cabo análisis o emitir diagnósticos en función de la información recolectada.

3.2 Desarrollo del sistema

La arquitectura de este sistema está compuesta por cuatro bloques principales: *1)* bloque de recolección de datos, *2)* bloque de alimentación, *3)* bloque de procesamiento y transmisión de datos y, *4)* bloque de visualización y almacenamiento de datos. La composición y conexión de cada bloque se muestra en la Figura 2, donde cada uno ejecuta un papel fundamental para el funcionamiento del sistema en general. A continuación, se describen en detalle en los siguientes párrafos.

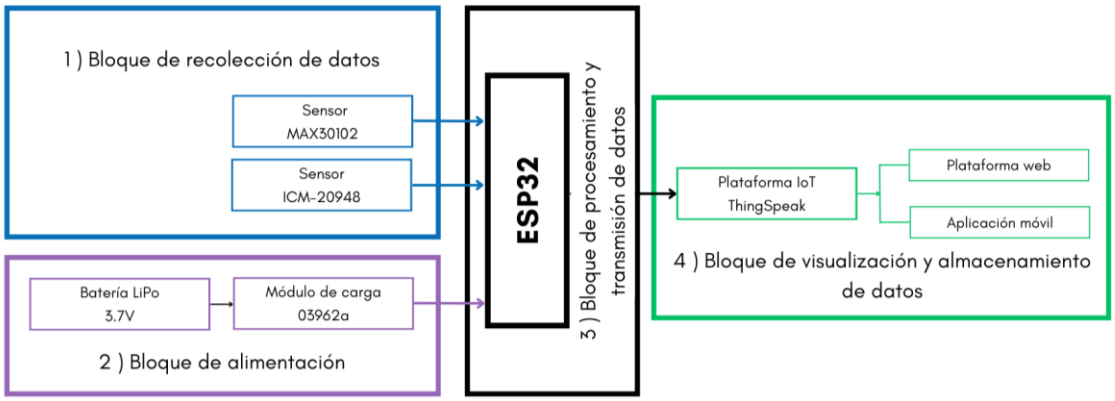


Figura 2. Diagrama de bloques de la arquitectura del sistema, donde: *1)* Bloque de recolección de datos, *2)* Bloque de alimentación, *3)* Bloque de procesamiento y transmisión de datos y, *4)* Bloque de visualización y almacenamiento de datos.

1) Bloque de recolección de datos.

Este bloque se encarga de la adquisición de señales fisiológicas y de movimiento de la persona. Está conformado por el sensor MAX30102, que actúa como módulo de detección de datos fisiológicos, diseñado para la monitorización de la saturación de oxígeno (SpO2) y la frecuencia cardíaca (FC) mediante fotopletismografía. Por otro lado, el ICM-20948 es el módulo encargado de la detección de señales de movimiento. Este sensor integra un conjunto de medición inercial compuesto por un acelerómetro de 3 ejes, un giroscopio de 3 ejes y un magnetómetro de 3 ejes; capaces de realizar un seguimiento de la actividad física del usuario donde permite registrar datos sobre la aceleración lineal, la velocidad angular y la orientación, lo que facilita un monitoreo completo del movimiento del usuario. Los sensores MAX30102 e ICM-20948, que conforman el bloque de recolección de datos, están conectados a través del protocolo de comunicación I²C al microcontrolador ESP32, que compone al bloque de procesamiento y transmisión de datos.

2) Bloque de alimentación.

Este bloque se encarga de la fuente de alimentación y la gestión de energía del dispositivo. Está constituido por una batería LiPo de 3.7 y el módulo de carga 03962A, el cual se encarga de regular la carga del sistema y protege al dispositivo de posibles sobrecargas, asegurando energía continua desde la batería. Permitiendo que el sistema mantenga su funcionamiento de manera eficiente, prolongando la vida útil de la batería y garantizando un rendimiento óptimo del dispositivo.

3) Bloque de procesamiento y transmisión de datos.

Este bloque es el que determina cómo serán procesados los datos obtenidos de los sensores, así como su transmisión mediante Wi-Fi en tiempo real hacia el bloque encargado de la visualización y almacenamiento de datos. Está compuesto únicamente por el microcontrolador ESP32 que es el núcleo de funcionamiento del dispositivo. Este bloque procesa las señales del MAX30102 utilizando filtros para calcular la frecuencia cardíaca en pulsos por minuto (ppm) y la saturación de oxígeno (SpO2) aplicando una tasa de muestro de 100sps. El ICM-20948 cuenta con tres sensores integrado: acelerómetro de tres ejes, giroscopio de tres ejes y magnetómetro de tres ejes. El acelerómetro de tres ejes obtiene datos de la aceleración lineal en los tres ejes espaciales: x,y,z de la misma manera que el giroscopio con la velocidad angular y el magnetómetro con el campo magnético. Se obtienen las magnitudes resultantes del acelerómetro en G (unidad de aceleración gravitacional) y del giroscopio en °/s (grados por segundo), que es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los componentes de un vector, en este caso los tres ejes espaciales de cada sensor. Para los datos del magnetómetro se procesaron para realizar una brújula digital que tomará el papel de ubicar la orientación del dispositivo, donde:

- 0° significa que el dispositivo está orientado directamente hacia el norte.
- 90**°** significa que el dispositivo está orientado hacia el este.
- 180° significa que el dispositivo está orientado hacia el sur.
- 270° significa que el dispositivo está orientado hacia el oeste.

En la Figura 3 mediante un diagrama de flujo se describe el procedimiento de la captura de datos de los sensores hasta su transmisión y almacenamiento en la nube de ThingSpeak. Primero, se configura la conexión de red Wi-Fi para la transmisión de datos hacia ThingSpeak y se inicializan los sensores: MAX30102 e ICM-20948. Se verifica si la conexión de la red fue exitosa, de lo contrario, el flujo regresa al bloque de configurar Wi-Fi para intentar reconectar, si es exitosa, el sistema avanza a la lectura de datos del sensor MAX30102. Está el sensor leyendo datos mientras se detecta pulso, si no hay detección de pulso el programa sigue esperando a que sea detectado. Si se verifica pulso comienza el envío de datos simultáneo del sensor MAX30102 e ICM-20948 hacia la plataforma ThingSpeak, los datos son enviados en tiempo real pero la plataforma los recibe cada 15 segundos. Si pasan 15 segundos los datos enviados se almacenan en la base de datos y se visualizan en la plataforma si no, se tiene que esperar al tiempo estimado para la recepción de datos en ThingSpeak. Al almacenar los datos capturados después de 15 segundos, se regresa al bucle de detección de pulso para esperar nuevos datos.

Por lo que, los datos que fueron capturados desde el sensor MAX30102 e ICM-20948 fueron procesados y serán enviados hacia la plataforma de ThingSpeak como: la magnitud resultante de la aceleración en valores de unidad de aceleración gravitacional (G), la magnitud resultante de la velocidad angular en valores de grados por segundo (°/s), la orientación hacia el norte magnético en grados (°), la frecuencia cardiaca en pulsos por minuto (ppm) y la saturación de oxígeno (%). Los datos de la frecuencia cardíaca o saturación de oxígeno pueden representar patrones anormales de lo que puede ayudar a identificar posibles episodios de estrés o ansiedad, por otro lado, con los datos del movimiento se obtendría un análisis más profundo del comportamiento físico y su relación con el estado emocional del usuario.

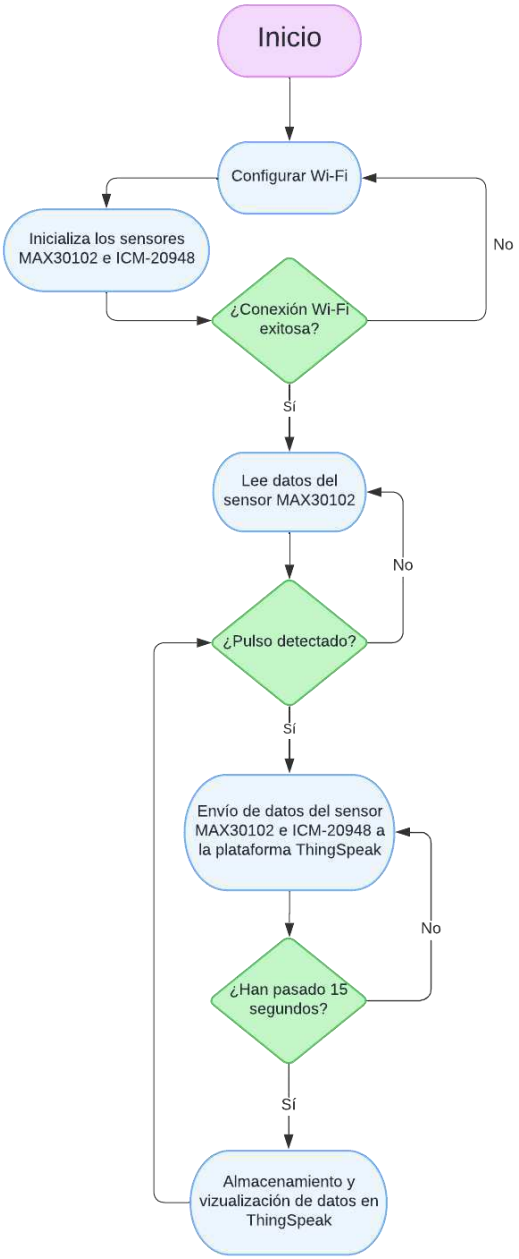


Figura 3. Diagrama de flujo del dispositivo.

4) Bloque de visualización y almacenamiento de datos.

Este último bloque, se encarga de almacenar en la nube y visualizar los datos recibidos que fueron enviados desde el bloque de procesamiento y transmisión de datos. Este bloque está compuesto por la plataforma IoT ThingSpeak que ofrece visualización de datos en tiempo real, así como su almacenamiento en archivos como json, xml y csv, para ser exportados y poder realizar un análisis posterior. Además de su plataforma web, cuenta con una aplicación móvil llamada ThingView donde puedes acceder a tus canales de monitoreo sólo desde tu API de usuario obteniendo la posibilidad de monitorear remotamente desde cualquier lugar con un teléfono inteligente. ThingSpeak es un servicio que cuenta con opciones gratis y de paga, por lo que se considera no escalable para

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 20, pp. 288 - 303.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

proyectos de trabajo que duren más de año por sus limitaciones en su plan gratis. De cualquier manera, ThingSpeak ofrece buenas opciones en su plan gratuito como la actualización de cada envío de datos cada 15 segundos y la recepción de 3 millones de envíos de datos por año. Por lo tanto, esta plataforma simplifica el acceso remoto a los datos, proporciona una interfaz gráfica para su visualización y ofrece una base de datos que puedes exportar para realizar análisis de manera independiente.

En la Figura 4 se presentan las gráficas de los datos capturados desde el dispositivo en la plataforma web de ThingSpeak donde se estableció un canal que incluye cinco campos dedicados a recibir datos de cada una de las variables que se monitorearán: Figura 4. *(a)* frecuencia cardiaca, Figura 4. *(b)* saturación de oxígeno, Figura 4. *(c)* aceleración lineal, Figura 4. *(d)* velocidad angular y la Figura 4. *(e)* orientación en base al norte magnético.

Figura 4. Gráficas de *(a)* Frecuencia Cardiaca, *(b)* Saturación de Oxígeno, *(c)* Aceleración Lineal, *(d)* Velocidad Angular y *(e)* Orientación, en la interfaz de la plataforma web de ThingSpeak.

En el eje "*y*" de las gráficas se muestran las unidades correspondientes a cada variable: pulsos por minuto en frecuencia cardiaca (ppm), la saturación de oxígeno en sangre en porcentaje (%), la aceleración lineal en unidades de gravedad (G), la velocidad angular en grados por segundo (°/s) y la orientación en base al norte en grados (°). Los rangos del eje "*y*" de cada gráfica se ajustan mientras los datos son adquiridos, y en el eje "*x*" se registra la fecha en que se capturaron los datos, aunque solo se muestra la hora. La fecha (día, mes, año y hora) junto con los datos de cada variable se capturan simultáneamente en un archivo CSV.

En la Figura 5, se muestran capturas de pantalla de la interfaz de usuario de la aplicación móvil ThingView. Donde en la Figura 5. *(a)* es el inicio de la aplicación, en el que se incorporó el canal del Dispositivo de Monitorización mediante la clave API de usuario. Aquí se encuentran los campos correspondientes a cada una de las variables, y se obtiene acceso a ellos una vez que se ha añadido el canal. En la Figura 5. *(b)* se presentan las gráficas de los campos creados en la plataforma web, destacando que las gráficas de ThingView muestran en el centro el promedio de los datos recibidos, además de que en la parte inferior se indican el valor mínimo, máximo y el último dato registrado, junto con la fecha de obtención.

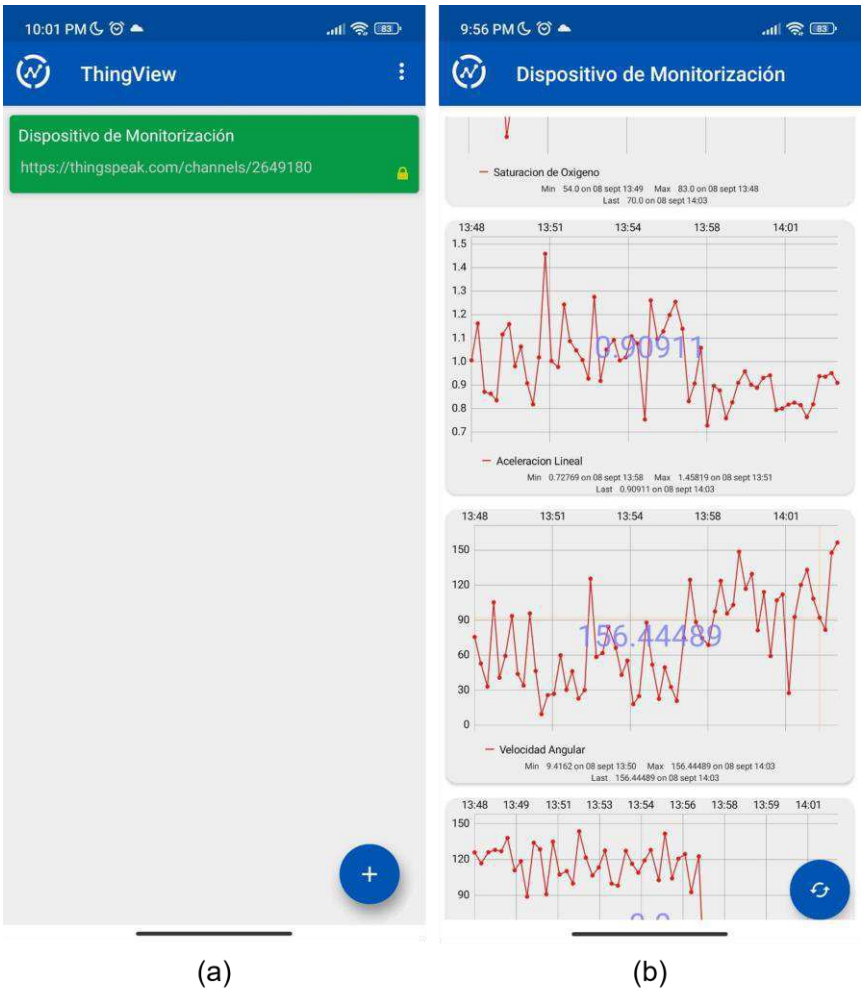


Figura 5. Interfaz de usuario del *(a)* inicio de la aplicación y las *(b)* gráficas de los campos desde la aplicación móvil ThingView.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 20, pp. 288 - 303.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

3.3 Conexiones del sistema.

La Figura 6 muestra las conexiones de los componentes de bajo costo utilizados en el dispositivo. Este diagrama detalla la integración de los sensores MAX30102 e ICM-20948 hacia el microcontrolador ESP32, y la conexión de la batería hacia el módulo de carga para finalmente alimentar al ESP32. Ambos sensores se comunican con el microcontrolador mediante el protocolo de comunicación I²C, donde los pines SDA y SCL de los sensores están conectados a los pines 21 y 22 del ESP32 respectivamente. Esta configuración asegura la transmisión y sincronización de los datos recolectados, lo que es esencial para obtener mediciones en tiempo real. Además de que la interfaz I²C permite la comunicación entre múltiples dispositivos con un mínimo de pines, reduciendo el diseño del sistema. Los sensores toman energía desde las conexiones de alimentación 3V3 y GND del microcontrolador, además de que el sensor ICM-20948 toma otra conexión a partir de AD0 hacia GND para definir su dirección I²C como 0x68. Por otro lado, el microcontrolador está conectado al módulo de carga 03962A, que gestiona de manera eficiente el ciclo de carga de la batería, tiene protección contra sobrecarga, sobrecalentamiento y cortocircuitos, garantizando la seguridad del sistema. El 03962a también incluye indicadores LED que informan sobre el estado de la carga, lo que asegura un monitoreo confiable sobre la batería.

(a) Batería LiPo 3.7V
(b) Módulo de carga 03962a
(c) ESP32
(d) ICM-20948
(e) MAX30102

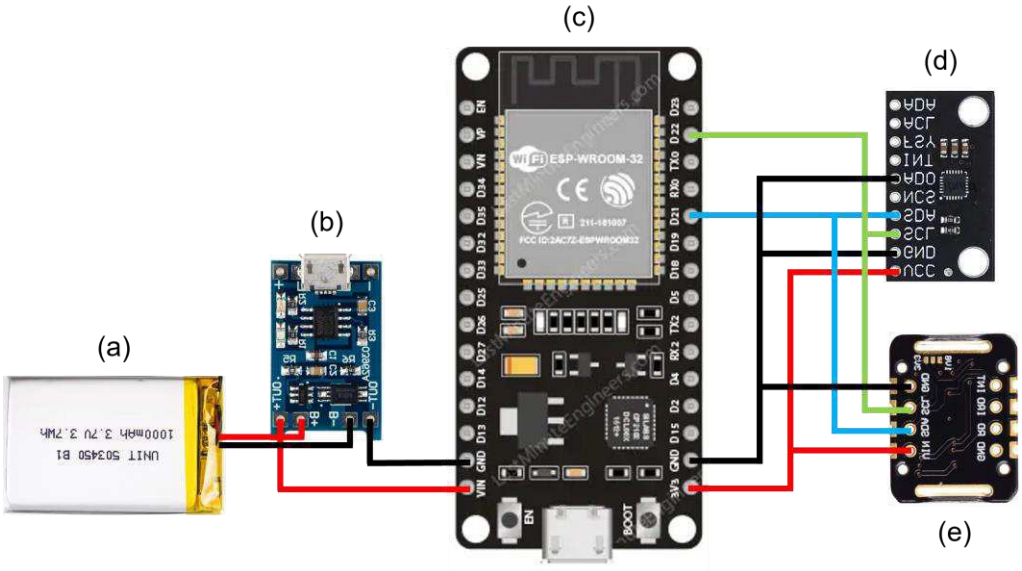


Figura 6. Diagrama de conexiones del dispositivo: *(a)* Batería LiPo 3.7V, *(b)* Módulo de carga 03962a, *(c)* ESP32, *(d)* ICM-20948, *(e)* MAX30102.

4. Resultados

El dispositivo final se presenta en la Figura 7, se probó su funcionamiento en el monitoreo de una persona adulta sin ningún diagnóstico mental denominada “persona control” en dos situaciones: en reposo y en movimiento dentro del hogar por una hora. El dispositivo fue tomado por el usuario con la mano izquierda y el sensor MAX30102 fue ligado con el dedo índice para evitar el mayor ruido

posible por resbalo. Los datos obtenidos por el dispositivo se exportaron desde la plataforma ThingSpeak en archivo .csv y se representaron en gráficas creadas en Excel.

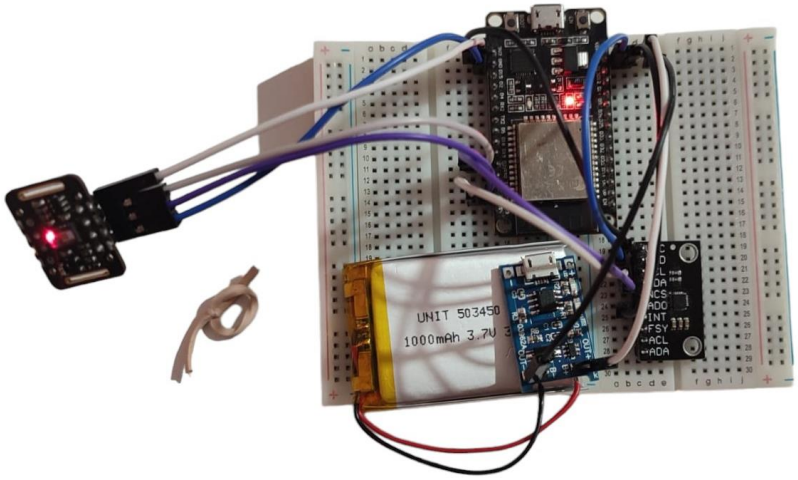


Figura 7. Dispositivo final

En la Tabla 2 se muestra el gasto total en pesos mexicanos de los componentes del dispositivo siendo un total de $428.57 obteniendo notables diferencias en el precio de los dispositivos comerciales que hoy en día son utilizados en todo tipo de investigaciones en el monitoreo de salud mental, ofreciendo una solución de bajo costo para pacientes vulnerables y para investigadores que tengan interés en las investigaciones extensas de salud mental.

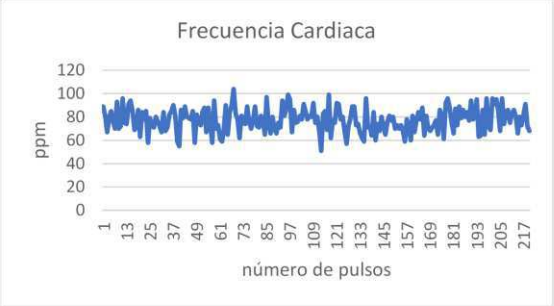
Tabla 2. Tabla de precios del dispositivo

MAX30102	ICM-20948	ESP32	03962a	Batería LiPo 3.7V
$39.76	$120.28	$110.63	$21.76	$136.14

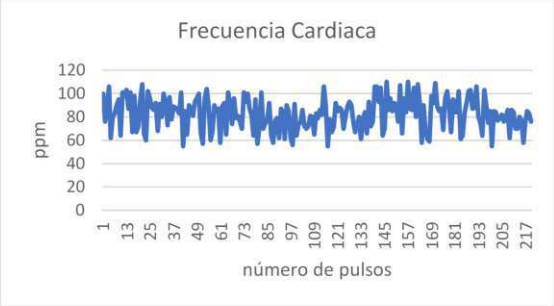
La Figura 8 presenta los resultados del funcionamiento del dispositivo a partir de gráficos de Excel, donde se observan dos modos de actividad diferentes: la columna de la Figura 8. (*1)* representas las gráficas de datos en reposo del usuario y la columna de la Figura 8. (*2)* en movimiento dentro del hogar. En el monitoreo de aproximadamente una hora se tomaron los primeros 220 pulsos (muestras) en cada situación. En el modo de reposo, los gráficos reflejan patrones estables, con variaciones mínimas en las mediciones de los parámetros fisiológicos y de movimiento, lo cual indica un estado de baja actividad física. Por otro lado, en el modo de movimiento, se presenta más variabilidad en los gráficos que corresponden a la actividad física del individuo mientras se desplazaba dentro del hogar. Esta comparación permite visualizar de manera efectiva las diferencias en las respuestas del sistema bajo distintas condiciones de actividad.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 20, pp. 288 - 303.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

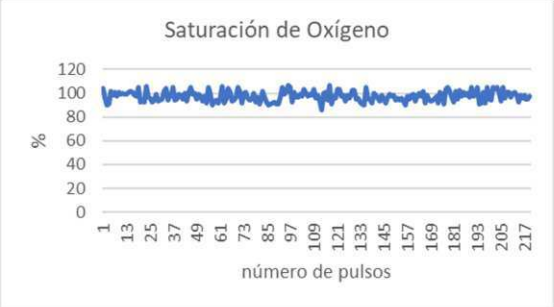
(1) (2)



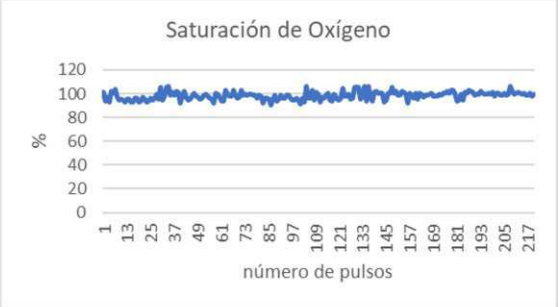
(a)



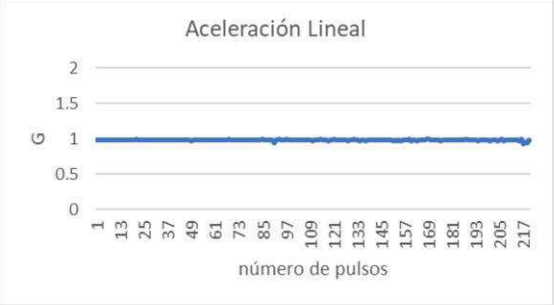
(b)



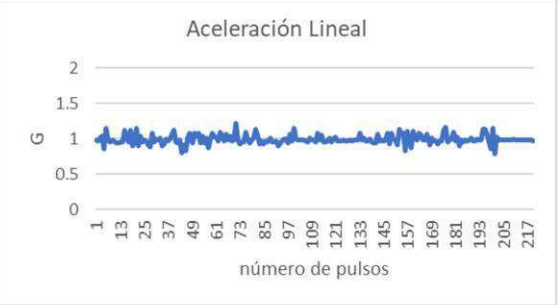
(c)



(d)



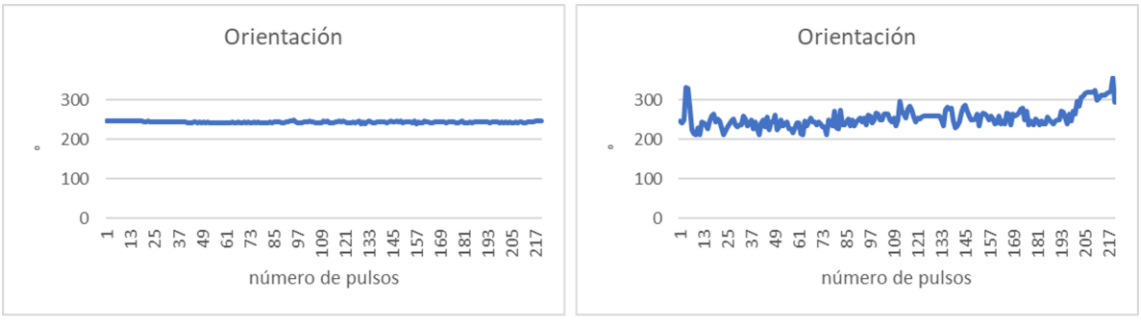
(e)



(f)

(g)

(h)



(i) (j)

Figura 8. Resultado del monitoreo *(1)* en reposo y *(2)* en movimiento del usuario. Donde en reposo, las gráficas son: *(a)* Frecuencia Cardiaca, *(c)* Saturación de Oxígeno, *(e)* Aceleración Lineal, *(g)* Velocidad Angular y *(i)* Orientación. En movimiento corresponden a: *(b)* Frecuencia Cardiaca, *(d)* Saturación de Oxígeno, *(f)* Aceleración Lineal, *(h)* Velocidad Angular y *(j)* Orientación.

El aumento en la frecuencia cardíaca en reposo puede ser un indicador de estrés o ansiedad. Un monitoreo constante de esta variable puede ayudar a identificar estados de estrés y ansiedad a lo largo del día del usuario. La saturación de oxígeno, por su parte, puede reflejar problemas respiratorios; además, al trabajar en conjunto con la frecuencia cardíaca, permite evaluar el impacto del ejercicio o del estrés en la salud física y mental. La aceleración lineal, la velocidad angular y la orientación proporcionan una visión más completa de la actividad física y del movimiento del usuario. Niveles bajos de actividad física pueden estar relacionados con síntomas de depresión a lo largo del día y la noche. Durante la noche, el monitoreo de estos parámetros, junto con datos fisiológicos, puede ofrecer información adicional sobre síntomas de depresión y ansiedad, así como otros problemas de salud mental, como el insomnio.

5. Conclusiones

Este trabajo, presentó la arquitectura y desarrollo de un dispositivo para la monitorización de salud mental con sensores de bajo costo donde se obtienen simultáneamente datos fisiológicos y datos del movimiento para buscar patrones de comportamiento que estén asociados a problemas de salud mental. Además, se ofrece a los profesionales de la salud mental una herramienta de bajo costo y accesible a comparación de las comerciales, con el objetivo para brindar monitoreo remoto de manera eficiente del paciente. También, representa una solución de bajo costo para investigadores que buscan estudiar parámetros con datos crudos relacionados con la salud mental en entornos cotidianos y/o en estudios de salud mental a gran escala.

A partir de la prueba de funcionamiento en dos modos de actividad distintos (en reposo y movimiento), se establecieron condiciones para la recolección y envío de datos: los pulsos por minuto debían estar entre 55 y 110 ppm, y la saturación de oxígeno debía oscilar entre 90% y 110%.

a) En reposo, se encontró que el 99.09% de los datos se situaban dentro del rango normal de frecuencia cardíaca para adultos, que es de 60 ppm a 100 ppm, mientras que solo el 0.91% de los datos se ubicaron fuera de este rango para un adulto sano. El promedio de frecuencia cardíaca de todos los datos fue de 77 ppm, dentro del rango normal. En relación con la saturación de oxígeno, el 91.36% de los datos se encontraron dentro del rango normal de 95% a 100%, quedando solo el 8.64% fuera de este rango. El promedio general de saturación de oxígeno para todos los datos fue de 97%, lo cual se considera dentro del rango de una persona sana. La aceleración lineal estuvo estable con un promedio de 0.98G cerca de 1G que representa 9.81 (m/s²) la aceleración que experimenta un objeto debido a la gravedad en la superficie de la Tierra. La velocidad angular promedió 0.99 °/s, con

valores cercanos al 0 debido al reposo del usuario. Y, por último, la orientación presentó valores estables a 244° que representa una dirección entre el sur y el oeste.

b) En movimiento, el porcentaje de datos que se ubicaron fuera del rango normal fue del 13.18%, lo que representa un aumento en comparación con el estado de reposo del usuario. Además, se registró un promedio de 83 ppm, que es superior a la frecuencia cardíaca promedio observado en reposo. En cuanto a la saturación de oxígeno, el 18.18% de los datos también se ubicaron fuera del rango normal, con un promedio de saturación de oxígeno del 98% dentro del rango aceptable. La aceleración lineal no mostró cambios significativos, manteniendo un promedio de 0.99 G. Por otro lado, la velocidad angular tuvo un promedio de 32.57 °/s, que es superior al valor registrado en reposo. Finalmente, la orientación se situó principalmente entre el sur y el oeste, reflejando la mayoría de los valores en este rango.

Se comprobó el funcionamiento del dispositivo mediante el monitoreo de una persona sana con datos capturados en los rangos normales de datos fisiológicos desde un 91.36% en reposo y un 81.82% en movimiento. Los valores válidos se reducen en actividad, lo que la representación de este dispositivo aún tiene oportunidades de mejora en la optimización del tamaño del dispositivo para asegurar un mejor posicionamiento del dispositivo y capturar datos más precisos y consistentes, lo que también aumentaría la comodidad del usuario. Para trabajos futuros, se está trabajando en el diseño electrónico del dispositivo con el objetivo de que se pueda definir como no invasivo, cómodo y que no interfiera en el entorno del usuario. Además, se buscará optimizar la precisión de las mediciones y la duración de la batería, asegurando que el dispositivo sea accesible y fácil de usar en diversas situaciones.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología CONAHCYT por su apoyo al Laboratorio Nacional de Sistemas Embebidos, Diseño Electrónico Avanzado y Microsistemas (LN-SEDEAM), proyectos números 282357, 293384, 299061, 314841, 315947 y 321128, también por la beca número 1301321.

Referencias

[1] GBD 2019 Mental Disorders Collaborators. (2022). Global, regional, and national burden of 12 mental disorders in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet Psychiatry*, 9(2), 137-150.

[2] Hammoudi Halat, D., Soltani, A., Dalli, R., Alsarraj, L., & Malki, A. (2023). Understanding and fostering mental health and well-being among university faculty: A narrative review. *Journal of clinical medicine*, 12(13), 4425.

[3] Sheikh, M., Qassem, M., & Kyriacou, P. A. (2021). Wearable, environmental, and smartphone-based passive sensing for mental health monitoring. *Frontiers in digital health*, 3, 662811.

[4] Hassantabar, S., Zhang, J., Yin, H., & Jha, N. K. (2022). Mhdeep: Mental health disorder detection system based on wearable sensors and artificial neural networks. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 21(6), 1-22.

[5] Kang, M., & Chai, K. (2022). Wearable sensing systems for monitoring mental health. *Sensors*, 22(3), 994.

[6] Robinson, T., Condell, J., Ramsey, E., & Leavey, G. (2023). Self-Management of Subclinical Common Mental Health Disorders (Anxiety, Depression and Sleep Disorders) Using Wearable Devices. *International journal of environmental research and public health*, 20(3), 2636.

[7] Zanardi, R., Prestifilippo, D., Fabbri, C., Colombo, C., Maron, E., & Serretti, A. (2021). Precision psychiatry in clinical practice. *International Journal of Psychiatry in Clinical Practice*, 25(1), 19-27.

[8] Vijayan, V., Connolly, J. P., Condell, J., McKelvey, N., & Gardiner, P. (2021). Review of wearable devices and data collection considerations for connected health. *Sensors*, 21(16), 5589.

[9] Welch, V., Wy, T. J., Ligezka, A., Hassett, L. C., Croarkin, P. E., Athreya, A. P., & Romanowicz, M. (2022). Use of mobile and wearable artificial intelligence in child and adolescent psychiatry: scoping review. *Journal of medical Internet research*, *24*(3), e33560.

[10] Moura, I., Teles, A., Silva, F., Viana, D., Coutinho, L., Barros, F., & Endler, M. (2020). Mental health ubiquitous monitoring supported by social situation awareness: A systematic review. *Journal of biomedical informatics*, *107*, 103454.

[11] Hickey, B. A., Chalmers, T., Newton, P., Lin, C. T., Sibbritt, D., McLachlan, C. S., ... & Lal, S. (2021). Smart devices and wearable technologies to detect and monitor mental health conditions and stress: A systematic review. *Sensors*, *21*(10), 3461.

[12] Nahavandi, D., Alizadehsani, R., Khosravi, A., & Acharya, U. R. (2022). Application of artificial intelligence in wearable devices: Opportunities and challenges. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, *213*, 106541.

[13] Ates, H. C., Nguyen, P. Q., Gonzalez-Macia, L., Morales-Narváez, E., Güder, F., Collins, J. J., & Dincer, C. (2022). End-to-end design of wearable sensors. Nature Reviews Materials, 7(11), 887-907.

[14] Hughes, A., Shandhi, M. M. H., Master, H., Dunn, J., & Brittain, E. (2023). Wearable devices in cardiovascular medicine. Circulation research, 132(5), 652-670.

[15] Frank, A. C., Li, R., Peterson, B. S., & Narayanan, S. S. (2023). Wearable and Mobile Technologies for the Evaluation and Treatment of Obsessive-Compulsive Disorder: Scoping Review. *JMIR Mental Health*, *10*, e45572.

[16] Lee, S., Kim, H., Park, M. J., & Jeon, H. J. (2021). Current advances in wearable devices and their sensors in patients with depression. *Frontiers in Psychiatry*, *12*, 672347.

[17] Iqbal, S. M., Mahgoub, I., Du, E., Leavitt, M. A., & Asghar, W. (2021). Advances in healthcare wearable devices. *NPJ Flexible Electronics*, *5*(1), 9.

[18] Topalidis, P., Florea, C., Eigl, E. S., Kurapov, A., Leon, C. A. B., & Schabus, M. (2021). Evaluation of a low-cost commercial actigraph and its potential use in detecting cultural variations in physical activity and sleep. *Sensors*, *21*(11), 3774.

[19] Al-Atawi, A. A., Alyahyan, S., Alatawi, M. N., Sadad, T., Manzoor, T., Farooq-i-Azam, M., & Khan, Z. H. (2023). Stress Monitoring Using Machine Learning, IoT and Wearable Sensors. *Sensors*, *23*(21), 8875.

[20] Abd-Alrazaq, A., AlSaad, R., Aziz, S., Ahmed, A., Denecke, K., Househ, M., ... & Sheikh, J. (2023). Wearable artificial intelligence for anxiety and depression: scoping review. *Journal of Medical Internet Research*, *25*, e42672.

[21] Ahmed, A., Aziz, S., Alzubaidi, M., Schneider, J., Irshaidat, S., Serhan, H. A., ... & Househ, M. (2023). Wearable devices for anxiety & depression: a scoping review. *Computer Methods and Programs in Biomedicine Update*, *3*, 100095.

[22] Lui, G. Y., Loughnane, D., Polley, C., Jayarathna, T., & Breen, P. P. (2022). The apple watch for monitoring mental health–related physiological symptoms: Literature review. *JMIR Mental Health*, *9*(9), e37354.

[22] Nakagome, K., Makinodan, M., Uratani, M., Kato, M., Ozaki, N., Miyata, S., ... & Oi, H. (2023). Feasibility of a wrist-worn wearable device for estimating mental health status in patients with mental illness. *Frontiers in Psychiatry*, *14*, 1189765.

[23] Kirschenbaum, M. (2022, marzo 3). *Fitbit, Apple Watch: How wearables could transform psychiatry*. Psychology Today. Recuperado el 2 de septiembre de 2024, de https://www.psychologytoday.com/us/blog/the-health-of-our-youth/202203/fitbit-apple-watch-how-wearables-could-transform-psychiatry

[24] Empatica. (n.d.). *E4 wristband*. Empatica. Recuperado el 1 de septiembre de 2024, de https://store.empatica.com/products/e4-wristbands?variant=17719039950953

[25] Fitbit. (n.d.). *Manual del usuario Fitbit Flex 2*. Fitbit. Recuperado el 2 de septiembre de 2024, de https://staticcs.fitbit.com/content/assets/help/manuals/manual_flex_2_es.pdf

[26] Apple. (n.d.). *About Bluetooth, Wi-Fi, and cellular on Apple Watch*. Apple Support. Recuperado el 8 de septiembre de 2024, de https://support.apple.com/en-us/111848

[27] Fitbit. (n.d.). *Fitbit Charge 5*. Fitbit. Recuperado el 2 de septiembre de 2024, de https://www.fitbit.com/global/us/products/trackers/charge5

[28] Long, N., Lei, Y., Peng, L., Xu, P., & Mao, P. (2022). A scoping review on monitoring mental health using smart wearable devices. *Math. Biosci. Eng*, *19*(8), 7899-7919.

[29] Alhejaili, R., & Alomainy, A. (2023). The use of wearable technology in providing assistive solutions for mental well-being. *Sensors*, *23*(17), 7378.

[30] Jin, J., Gao, B., Yang, S., Zhao, B., Luo, L., & Woo, W. L. (2020). Attention-block deep learning based features fusion in wearable social sensor for mental wellbeing evaluations. *Ieee Access*, *8*, 89258-89268.

[31] Gom Asha, N. E. J., & Khan, R. (2021, June). Low-cost heart rate sensor and mental stress detection using machine learning. In *2021 5th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)* (pp. 1369-1374). IEEE.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 21, pp. 304 - 322.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

BioAir: una Herramienta Móvil para el Acceso a Datos de la Calidad del Aire

Huerta Ordaz Juan Manuel y Hernández Zavala Antonio*

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA) Unidad Querétaro, Av. Cerro Blanco 141, Colinas del Cimatario, C.P. 76090, Querétaro, Querétaro, México.

jhuertao2400@alumno.ipn.mx; *anhernandezz@ipn.mx

Resumen

Actualmente, la mayoría de las aplicaciones comerciales que presentan el índice de calidad del aire, no proporcionan datos detallados de la zona circundante, ni ofrecen un acceso libre sin suscripciones premium o publicidad, limitando su utilidad y provocando desinterés en los usuarios. Además, la mayoría carece de alertas, notificaciones, mapeados detallados, recomendaciones y advertencias que permitan la toma de decisiones rápidas para proteger la salud. Para resolver este problema, en este trabajo se presenta una aplicación que ofrece información detallada y en tiempo real sobre la calidad del aire no solo en su ubicación, sino también en otras localidades registradas en el sistema, sin publicidad o modelos de suscripción. La aplicación garantiza un acceso a los datos actuales, sumado a funcionalidades clave para mejorar la experiencia del usuario. A través de un diseño intuitivo y accesible, la aplicación permitirá a cualquier persona interpretar fácilmente el índice de calidad del aire y sus componentes, así como los riesgos derivados. Además, se incorporan alertas automáticas que informen sobre cambios críticos en la calidad del aire, especialmente en la Zona Metropolitana de Querétaro (ZMQ), así como recomendaciones claras para comprender mejor los datos y conceptos para actuar de manera efectiva. La escalabilidad del proyecto permitirá ampliar sus funciones y disponibilidad en diferentes plataformas, garantizando la accesibilidad a un mayor número de usuarios a una herramienta confiable y útil para el cuidado de la salud.

Palabras clave: aplicaciones móviles, calidad del aíre, diseño adaptable, acceso a datos remotos

1. Introducción

La calidad del aire es un tema crucial que es ignorado o desconocido por la mayoría de la población. La exposición a un Índice de la Calidad del Aire ICA (AQI por sus siglas en inglés Air Quality Index) alto se refiere a un nivel donde los contaminantes en el ambiente provocan problemas de salud en niños y adultos a corto plazo, presentándose dificultades para respirar, neumonía, irritación de la nariz, garganta, ojos, piel y bronquitis recurrente. Mientras que la exposición a largo plazo puede provocar daño al sistema nervioso, ictus, sibilancias crónicas, afecciones pulmonares crónicas como asma, enfisema y cáncer de pulmón [1].

Más de 6,000 ciudades de 117 países monitorean la calidad del aire, sin embargo, los ciudadanos de dichas ciudades siguen respirando niveles insalubres. Esto se origina por el uso de combustibles fósiles [2]. El ICA ayuda a notificar al público sobre la calidad del aire alrededor del lugar donde viven y trabajan los ciudadanos permitiendo conocer los riesgos individuales para la salud. El ICA considera los siguientes seis contaminantes: Partículas de 10 y 2.5 Micrómetros de diámetro (PM 10 y PM 2.5), Ozono (O3), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Azufre (SO2) y Dióxido de Nitrógeno (NO2) [1].

Beatriz Cárdenas, directora de calidad del aire global de World Resources Institute (WRI), asegura que la contaminación del aire es el principal riesgo ambiental a nivel mundial. Según la OMS, cada año 6,7 millones de muertes prematuras se atribuyen a los efectos combinados de la contaminación al aire libre y del doméstico. En 2019, México registró más de 48 mil muertes prematuras debido a la exposición al aire contaminado [3].

La tecnología móvil ha tenido un impacto significativo en la calidad de vida de las personas en todo el mundo. Algunos de los aspectos que han mejorado con la llegada de la tecnología móvil es la comunicación y el acceso a la información. Esto es posible mediante la implementación de las aplicaciones móviles, que son un software diseñado para ejecutarse en los smartphones (teléfonos inteligentes), tabletas y otros dispositivos móviles.

Las aplicaciones móviles se han posicionado como unas de las herramientas más eficaces, facilitando diversos aspectos de nuestra rutina diaria y destacando en campos que necesitan una optimización urgente [4]. Y no es para menos, pues las aplicaciones promueven la interconectividad y mejoran la experiencia en la adquisición de productos y servicios [5]. En ese sentido, investigaciones recientes han destacado la necesidad de interfaces intuitivas y procesos de aprendizaje accesibles para garantizar la aceptación y el uso continuo. Se pueden encontrar aplicaciones que son creadas como respuesta a necesidades básicas o esenciales para un óptimo desarrollo [6]. Según Arroyo [7] "*El desarrollador encuentra en ella un escaparate idóneo para contactar con el usuario final, y éste un lugar de confianza donde encontrar aplicaciones*".

La facilidad percibida se refiere a la percepción subjetiva de un individuo sobre la facilidad con la que puede hacer uso de una tecnología particular, no solo limitada a la interfaz, sino que también abarca la integración de procesos existentes y compatibles con las tareas diarias. Siempre considerando la simplicidad en la navegación, la claridad en las funciones y la coherencia con las expectativas de los usuarios [8].

El objetivo primordial de este trabajo es desarrollar una interfaz móvil que pueda ser descargada e instalada a petición en dispositivos Android, para la visualización de los datos de calidad del aire, respecto a diferentes estaciones de monitoreo en tiempo real y desde la ubicación del dispositivo. Con el fin de generar auto critica para la evaluación de riesgos a la salud, proporcionando recomendaciones y advertencias respecto al nivel de ICA presentado en la zona. Se designo el desarrollo de una interfaz móvil, previsto por el aumento de tiempo del uso de los dispositivos móviles, teniendo como base que las aplicaciones móviles se han convertido en herramientas esenciales y de uso cotidiano para las personas, dado que estas facilitan la vida de los usuarios, promoviendo la interconectividad y mejoran la experiencia en la adquisición de productos y servicios. Actualmente la necesidad de las aplicaciones móviles está vinculada a las funcionalidades que puede ofrecer más allá de la información que pueda ofrecer una página web [9].

El artículo se organizó de la siguiente manera: en la sección 2 se presentan algunas de las aplicaciones actuales más descargadas y utilizadas por los usuarios; en la sección 3 se presenta el diseño del maquetado de la aplicación que se desarrolló; en la sección 4 se presentan los resultados obtenidos de la aplicación, mientras en la sección 5 se compararan las aplicaciones que se consideraron en este estudio; finalmente se presentan las conclusiones obtenidas del trabajo desarrollado.

2. Aplicaciones actuales para la interpretación del índice de la calidad del aire

Es de suma importancia el mantener informada a la población sobre el ICA, aún más cuando este afecta directamente a la salud. Actualmente aplicaciones como AQI, AirVisual, Plume Labs, My AQI Air, etc., se pueden obtener desde la App Store o Play Store, teniendo el mismo propósito de informar sobre las condiciones del aire en la zona que se encuentra el usuario, algunas con mayor precisión y detalle, al igual algunas se centran solo en un área de cobertura especifica. De igual manera existen aplicaciones desarrolladas con mayor prestigio al ser publicadas en conferencias internacionales, subrayando su innovación y relevancia en el campo. A continuación, se presentan las 25 aplicaciones

actuales que se consideraron para realizar un estudio en general, además de anexar una breve descripción de estas en la Tabla 1.

Tabla 1. Aplicaciones utilizadas actualmente para obtener información del ICA

Aplicación	Descripción
AQI	AQI, muestra el ICA en tiempo real a través de las estaciones de monitoreo más cercanas al usuario. Adquiriendo datos en más de 10.5K estaciones en todo el mundo [10].
AirVisual	AirVisual, tiene el objetivo de dar a conocer la información más confiable, al poseer más de 500K estaciones ubicadas al rededor del mundo [11].
Plume Labs	Plume Labs, da a conocer la contaminación exterior en el entorno del usuario, mediante un mapeado de la contaminación entre calle y calle de las áreas urbanas más grandes del mundo, y detallando cómo evolucionará la contaminación en las próximas 72 horas, para proporcionar una información más detalla al usuario final [12].
My AQI Air	My AQI Air, proporciona información sobre la calidad del aire, que se encuentre cerca de tu entorno, respecto a los 6 principales contaminantes [13].
Check Air Quality Index	Check Air Quality Index, determina los niveles de contaminación respecto a la estación de monitoreo más cercana respecto a la ubicación del dispositivo. Proporciona datos en más de 88 países, con más de 11K estaciones en 1K de las ciudades principales [14].
Taiwan Air Quality Index	Taiwan Air Quality Index, proporciona información sobre la calidad del aire de Taiwán, advirtiendo a los usuarios de este país sobre el impacto hacia su salud [15].
AQI American Embassy	AQI American Embassy, es una simple aplicación que muestra un histograma respecto al ICA y el PM, en Beijing, Chengdu, Guangzhou, Shanghái, Shenyang [16].
	AQI American Embassy Pro, es la versión de paga de la aplicación anterior con el diferenciador de no tener anuncios [16].

AQI American Embassy Pro	
	Air Pollution Index, proporciona una cierta cantidad de información al usuario convencional e información más extensa a usuarios mediante suscripción, para el conocimiento del ICA en su zona actual [17].
Air Pollution Index	
	ESF HK AQI, proporciona información sobre el estado del aire en algunas escuelas de Hong Kong, USA, etc. Teniendo acceso restringido para solo algunos usuarios que cuenten con un usuario y contraseña [18].
ESF HK AQI	
	Air Quality Near Me, mantiene informado a los usuarios con información en tiempo real, actualizándose respecto a las estaciones más cercanas de la ubicación del dispositivo. Adquiriendo información en más de 10K ciudades de 80 países [19].
Air Quality Near Me	
	Air Quality Index, muestra información del ICA en muchos países de América del Norte, del Sur, Europa, Asia y Australia, dando la posibilidad de establecer el índice referente a sus políticas de cada País [20].
Air Quality Index	
	AirPro AQI, es una aplicación acompañada de sus dispositivos para el monitoreo de la calidad del aire, o respecto algunos componentes [21].
AirPro AQI	
	Air Quality, informa al usuario final respecto a la calidad del aire en su zona, además de dar a conocer las implicaciones que se tiene a la salud [22].
Air Quality	
	Live Aire, proporciona información verdadera y exacta respecto al ICA, cubriendo más de 3.9M de localidades alrededor del mundo. Con el cual podrás acceder a la información en tiempo real desde la ubicación exacta del dispositivo [23].
Live Aire	
	Índice de calidad del aire, presenta datos en tiempo real respecto al ICA desde estaciones locales o más cercanas de la ubicación del usuario, proporcionando información detallada de los componentes presentes en el aire [24].
Índice de calidad del aire	
	La aplicación The AQI, brinda información sobre el ICA en la localidad más cercana del usuario, cubriendo un radio de 500 kilómetros. Además, se puede acceder a la información incluso al no tener conexión a internet, y proporcionando información de RSS más reciente sobre el tema y la salud [25].
The AQI	

Calidad del aire: eAirQuality	eAirQuality, muestra el ICA como los contaminantes presentes a partir de diversas fuentes, desde estaciones de medición de la calidad del aire en tierra, como sistemas de control del aire satelitales. Proporcionando información a múltiples ciudades alrededor del mundo [26].
European Air Quality Index	European Air Quality Index, da a conocer la calidad del aire en Europa, obteniendo datos en más de 3.5 K estaciones en Europa [27].
Air Quality & Pollen	Air Quality & Pollen, realiza un seguimiento respecto al ICA, polen y rayos UV. Esta obtiene los datos mediante estaciones satelitales, terrestres y meteorológicas para calcular el ICA más preciso para la ubicación del usuario final [28].
EPA's AIRNow	AIRNow, proporciona información respecto al ICA, teniendo el propósito de obtener informes específicos de la ubicación en la calidad del aire actual y pronósticos de calidad del aire para ozono y la contaminación de partículas finas (PM 2,5) [29].
Airveda	Airveda, presenta el ICA alrededor del mundo, además de tener la posibilidad de conectar estaciones de monitoreo portátiles o propias [30].
SAAQIS	SAAQIS, está enfocada en Sudáfrica, obteniendo los datos mediante estaciones de monitoreo propias. Además de proporcionar recomendaciones e información referente al tema [31].
CitiSense	CitiSense, muestra el ICA y detalles de los contaminantes, además de una gráfica que muestra los datos históricos 18 horas atrás [32].
Air Quality Check	Air Quality Check, solo muestra el valor del PM en general además del CO [33].

En la Tabla 2, se distinguen las características primordiales que debe tener una aplicación móvil enfocada en la difusión del tema sobre el ICA. A partir del análisis realizado respecto a las aplicaciones anteriormente mencionadas en la Tabla 1, se establece que, al obtener la ubicación del dispositivo, se puede proporcionar la información de manera detallada y concisa al usuario respecto a su entorno. Algunas aplicaciones como Taiwan Air Quality Index, AQI American Embassy, AQI American Embassy Pro, SAAQIS, proporcionan datos enfocados primordialmente a sus países, sin dar la posibilidad que dichas aplicaciones puedan ser utilizadas fuera de este. Por otro lado, algunas aplicaciones como ESF HK AQI, AirPro AQI son de uso restringido y no para el uso de usuarios en general. Además, se tiene que tomar en cuenta que en las aplicaciones CitiSense y Air Quality Check, no se pueden realizar comparaciones tan detalladas al no encontrarse en el mercado, teniendo como base las capturas obtenidas por los documentos donde fueron publicados.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 21, pp. 304 - 322.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Tabla 2. Características de un App respecto al ICA

	Nivel de ICA	Componentes del aire	Alertas	Notificaciones	Mapeados del ICA	Advertencias	Recomendaciones	Datos Históricos	Predicciones	Gratuita	Paga	Suscripción Premium	Anuncios	Información sobre el tema	Celulares	IPad / Tablet	Laptop / CPU	Android	IOS
AQI	✓	✓	-	-	✓	✓	-	✓	-	✓	-	-	-	✓	✓	✓	-	✓	✓
AirVisual	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	-	-	-	✓	✓	-	-	✓	✓
Plume Labs	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	✓	✓
My AQI Air	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	-	-	✓
Check Air Quality Index	✓	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓
Air Pollution Index	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	✓
Air Quality Near Me	✓	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	-	-	✓
Air Quality Index	✓	✓	-	-	✓	-	-	-	-	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	-	-	✓
Air Quality	✓	✓	-	-	✓	-	-	-	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	-	-	✓
Live Aire	✓	✓	-	-	✓	-	✓	✓	-	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	-	✓
Índice de calidad del aire	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	✓	-	-	✓	-
The AQI	✓	✓	-	-	✓	-	-	-	-	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	✓	-
Calidad del aire: eAirQuality	✓	✓	-	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	-	-	✓	-
European Air Quality Index	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	-	-	✓	-
Air Quality & Pollen	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
EPA's AIRNow	✓	✓	-	-	✓	-	✓	✓	-	✓	-	-	-	-	✓	-	-	✓	-
Airveda	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	-	-	-	✓	-	-	✓	-
CitiSense	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	✓	-	-	✓	-
Air Quality Check	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	✓	-	-	✓	-

Además de las características que debe tener una aplicación enfocada en informar a la población sobre el ICA como se mostró en la Tabla 2, se debe tener en cuenta algunas características primordiales de cualquier aplicación enfocadas en el diseño, para facilitar su uso, presentación de la información, etc. Esto se puede ver reflejado en la Tabla 3, donde la columna “Facilidad de uso” hace referencia a la facilidad de navegación que tiene el usuario al utilizar la aplicación; en la columna “Estética Visual” se refiere al atractivo visual; la columna “Consistencia de diseño” se refiere a la coherencia de diseño entre todas las pantallas; la columna “Flujo lógico de interacción” describe el flujo de interacciones para guiar al usuario de manera eficiente y práctica; la columna “Diseño adaptable (Responsive)” representa la adaptabilidad que debe tener la aplicación para cualquier tamaño de celular o iPad; la columna “Latencia” expone la velocidad de carga del contenido, por último la columna “Seguridad” representa la protección de los datos del usuario, así como la posibilidad de borrar estos cuando el usuario así lo desee.

Tabla 3. Características del diseño de una Aplicación Móvil

	Facilidad de Uso	Estética Visual	Consistencia de Diseño	Flujo Lógico de Interacción	Diseño Adaptable	Latencia	Seguridad
AQI	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
AirVisual	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Plume Labs	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
My AQI Air	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓
Check Air Quality Index	-	-	✓	✓	✓	✓	✓
Air Pollution Index	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Air Quality Near Me	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Air Quality Index	-	-	✓	✓	✓	✓	-
Air Quality	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Live Aire	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Índice de calidad del aire	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
The AQI	✓	✓	-	✓	✓	-	-
Calidad del aire: eAirQuality	✓	-	✓	✓	✓	✓	-
European Air Quality Index	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
Air Quality & Pollen	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
EPA’s AIRNow	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Airveda	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
CitiSense	✓	-	✓	✓	-	-	-
Air Quality Check	-	-	✓	-	-	-	-

3. Desarrollo del modelado de la interfaz móvil

Tomando como base la información de las tablas anteriores donde se puede apreciar las características principales que debe tener una aplicación para informar sobre el ICA y su diseño, además de los requerimientos solicitados, se desarrolló un maquetado de la aplicación para su implementación. Comenzando por la primera interfaz donde se presenta un login y se darán de alta los usuarios para poder hacer uso de la aplicación de manera gratuita, esto con el fin de realizar sondeos mediante la edad, sexo, etc., de las personas que se interesan o se preocupan por el tema como por su salud. El concepto de estas interfaces mencionadas se visualiza en la Figura 1.

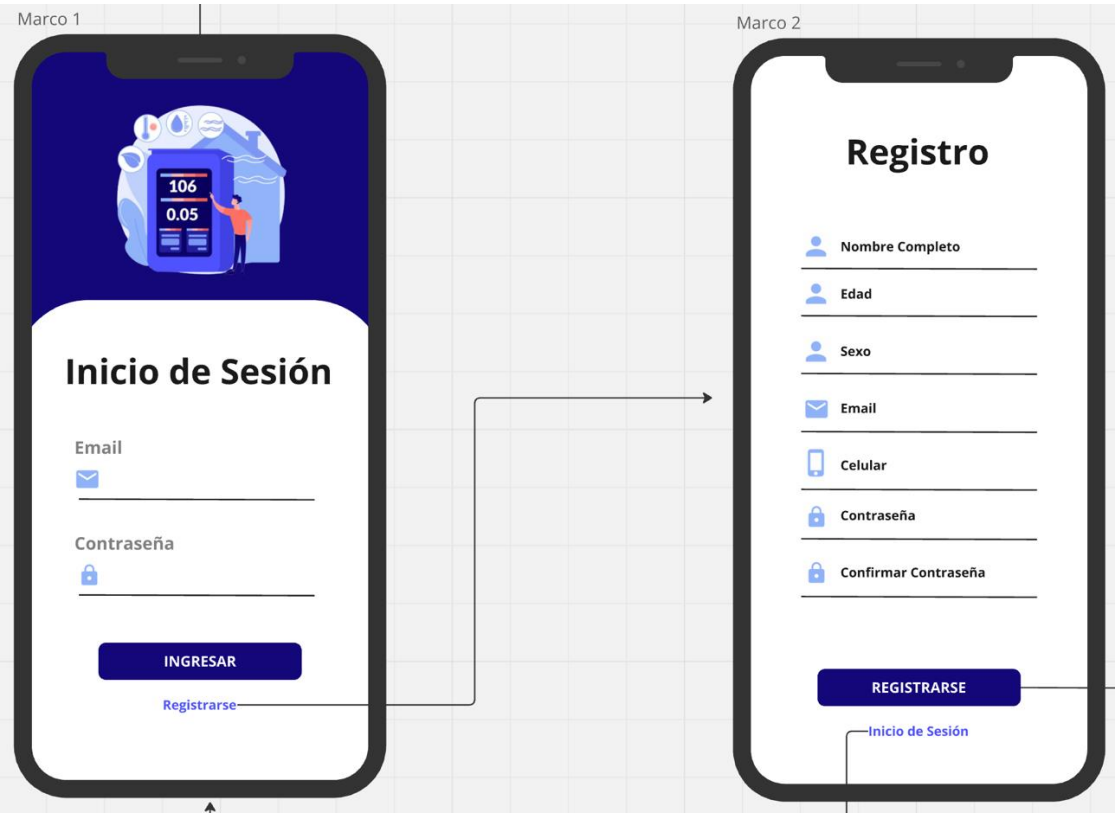


Figura 1. Maquetado del login y registro de la aplicación.

Posteriormente se presentan las dos interfaces donde, en la primera pantalla se dará a conocer el ICA respecto a la ubicación del dispositivo, mientras que en la segunda interfaz se mostraran los datos de los componentes en tiempo real, así como advertencias y recomendaciones referentes al nivel de ICA, esto se visualiza en la Figura 2.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 21, pp. 304 - 322.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Figura 2. Maquetado de la interfaz principal y de la interfaz que contendrá los datos de los componentes.

Consecutivamente, se podrá visualizar un mapeado mediante Google Maps donde se obtendrá los ICA de algunas ubicaciones donde se cuente con una estación de monitoreo de la calidad del aire, mientras que la penúltima interfaz se mostrarán los datos respecto a las estaciones de monitoreo donde se obtienen datos del ambiente en la Zona Metropolitana de Querétaro (ZMQ), esto se puede visualizar en la Figura 3.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 21, pp. 304 - 322.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Figura 3. Maquetado de la interfaz del mapeado como del listado de estaciones.

Por último, se muestra la interfaz donde se presentará la cuenta del usuario y además de tener la posibilidad de obtener más información referente a los componentes, así como los términos que se emplean en el tema sobre el ICA. Esta se visualiza en la Figura 4.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 21, pp. 304 - 322.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

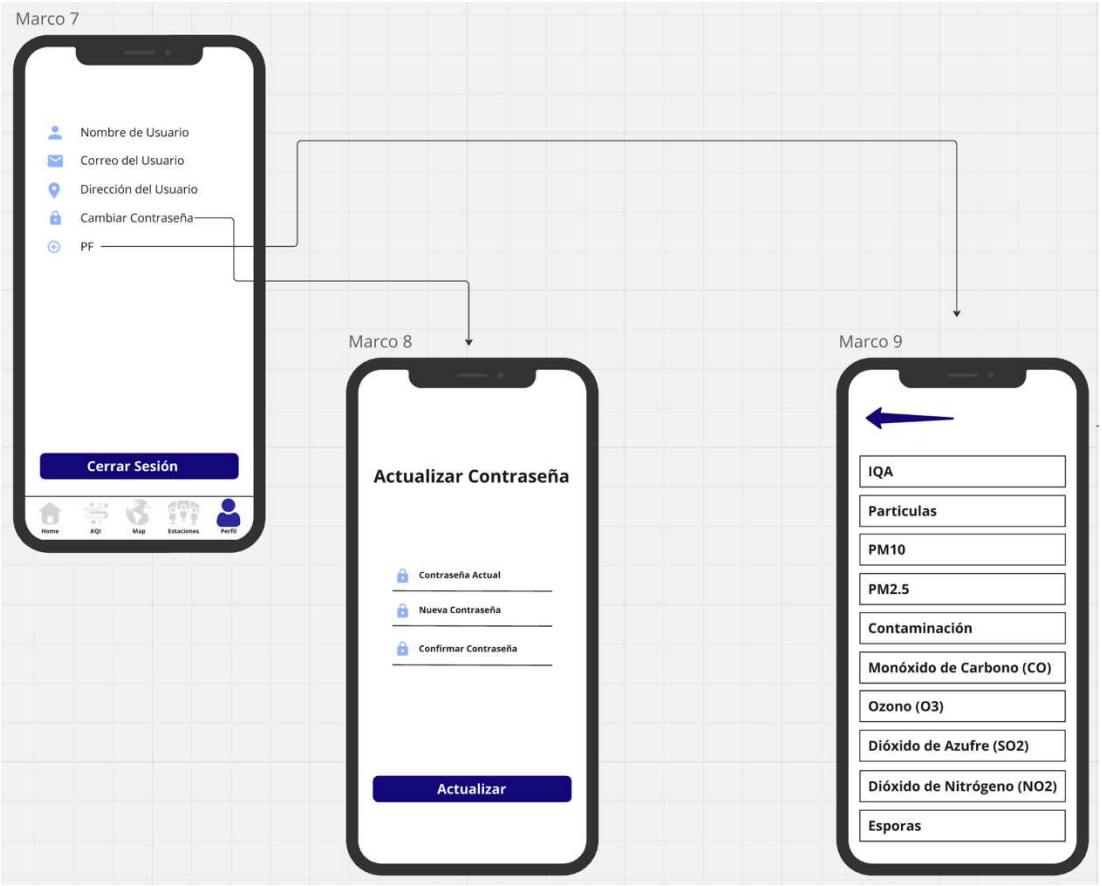


Figura 4. Maquetado para la interfaz donde se podrá obtener información referente al tema del ICA y visualizar los datos del usuario.

4. Resultados

Una vez teniendo el maquetado finalizado de la aplicación presentado en las Figuras 1, 2, 3, y 4, se desarrolló en Android Studio, donde se llevaron a cabo una serie de evaluaciones y simulaciones, favoreciendo la validación y corrección de errores que se presentaron durante su ejecución. Al mismo tiempo se estructuró e implementó la creación de un API, para la realización de consultas respecto a los datos del ICA, mediante la ubicación obtenida desde el dispositivo móvil y así poder exponer la información referente al tema de una forma clara y especifica.

En la Figura 5, se puede visualizar la primera interfaz, que vera todo usuario al entrar a la aplicación, solicitando solamente el correo electrónico junto a su contraseña generada al darse de alta en la aplicación, de lo contrario dicho usuario tiene la posibilidad de darse de alta donde se solicitan datos básicos y una vez realizado el registro se puede iniciar sesión sin problema.

Figura 5. Resultado del desarrollo del Login

Una vez iniciada la sesión se visualizará el ICA en la zona que se encuentra el dispositivo, obteniendo el valor de la estación más cercana al usuario, así como su ubicación en tiempo actual explicando el nivel indicado al usuario, esto se puede apreciar en la Figura 6.

Figura 6. Resultado de la interfaz principal del App

La segunda interfaz que se muestra la Figura 7, en la cual el usuario puede observar el valor de los componentes que se encuentran en su zona y que la estación pueda capturar, así como las recomendaciones y advertencias que debe tener en cuenta el usuario respecto a estos componentes y en general para el ICA.

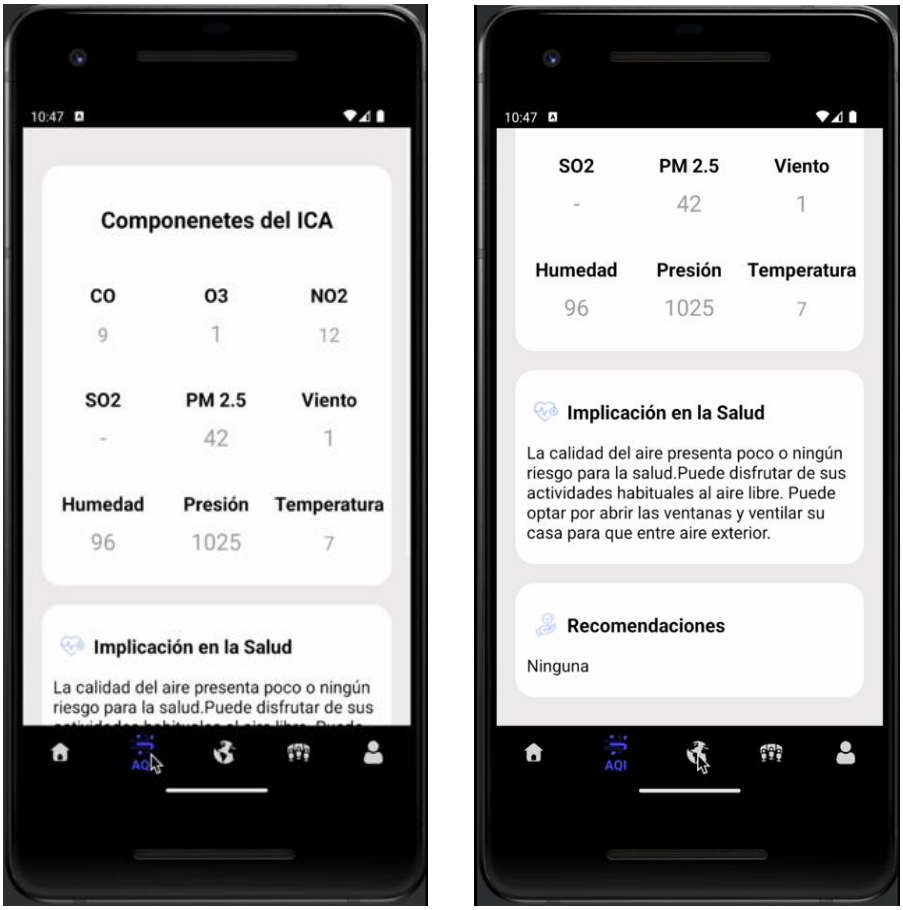


Figura 7. Resultado de la segunda interfaz, para la visualización de componentes, así como de las recomendaciones y advertencias considerando estos.

Por consiguiente, se puede visualizar en la Figura 8, un mapeo respecto al ICA donde se identifican las zonas donde cuentan con una estación de monitoreo, así como se puede apreciar la ubicación de las estaciones con las que cuenta el proyecto, en la ZMQ.

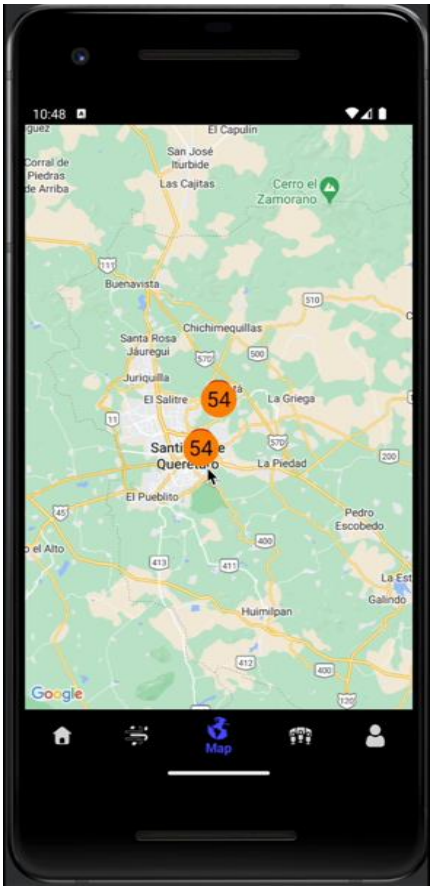


Figura 8. Resultado de la interfaz sobre el mapeado referente al ICA.

Por último, se obtiene la interfaz donde se apreciará el listado de estaciones a las que se tiene acceso a la información, así como el estado de la calidad del aire respecto a estas zonas, y sus datos históricos sobre algunos componentes, además de sus ubicaciones. Esto se puede visualizar en la Figura 9.

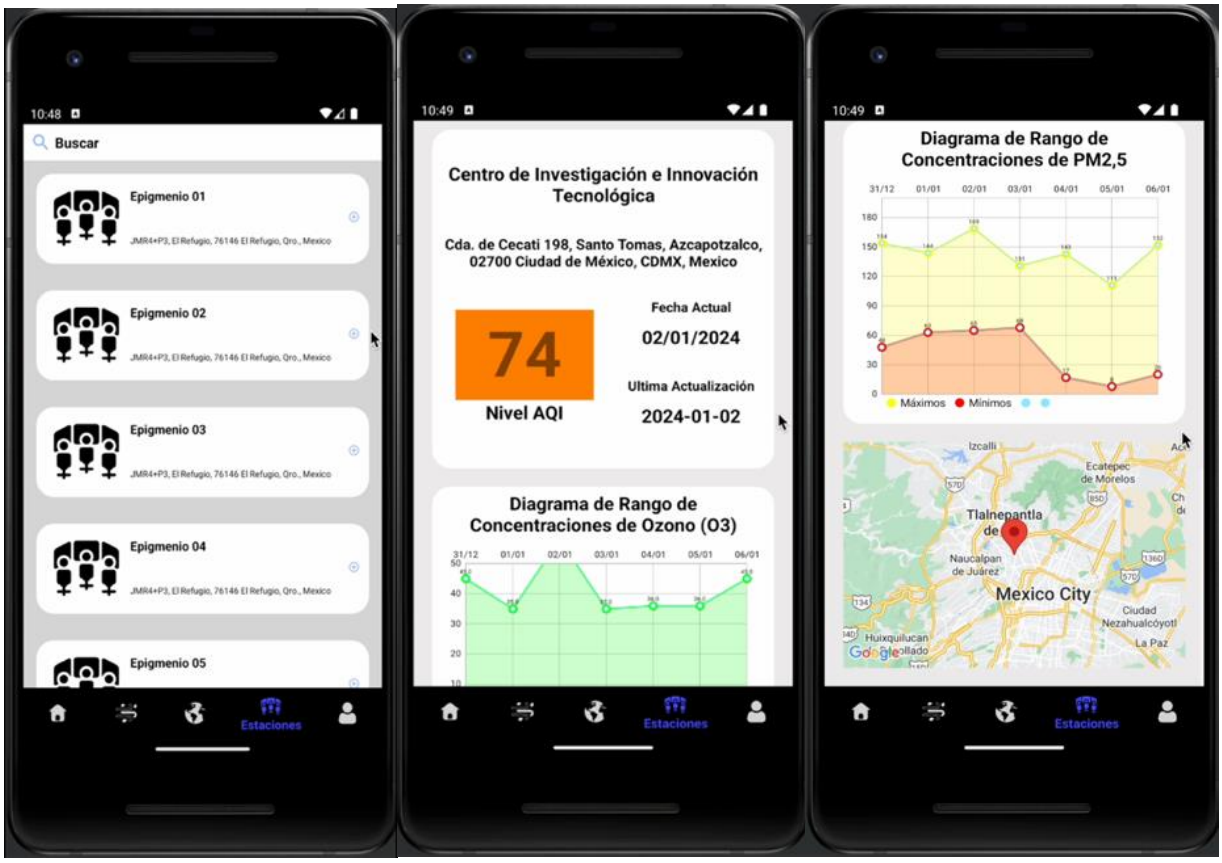


Figura 9. Resultado de la interfaz para mostrar el listado de estaciones.

5. Discusión

Comparando los resultados obtenidos en relación con las aplicaciones seleccionadas, se observa que la Figura 5 se distingue de la mayoría de las aplicaciones al incluir un sistema de inicio de sesión (Login). Por su parte, en la Figura 6 se presenta el ICA de manera clara y detallada, facilitando al usuario su interpretación y permitiéndole conocer, de forma inmediata, la calidad de aire su zona. Además, la Figura 7 proporciona información más detallada sobre los componentes del aire, acompañada de recomendaciones y advertencias para proteger la salud del usuario. En la Figura 8, se destaca la posibilidad de visualizar el ICA de las ubicaciones que cuentan con estaciones de monitoreo a nivel mundial, incluyendo estaciones locales gubernamentales y de bajo costo. Finalmente, en la Figura 9 se muestra el acceso a información en tiempo real desde dichas estaciones.

Al comparar los datos recopilados en la Tabla 2 con los de la aplicación desarrollada, se puede concluir que, en ciertos aspectos, se equipara con algunas de las aplicaciones mejor valoradas. Se destaca, principalmente, por ofrecer acceso a información relevante sin recurrir a publicidad o suscripciones premium, facilitando al usuario el acceso completo a los datos sin inconvenientes. Asimismo, la aplicación está diseñada para que cualquier tipo de usuario pueda utilizarla y comprender los datos fácilmente.

Por otro lado, al revisar los resultados de la Tabla 3, se evidencía que la aplicación desarrollada cumple con los requisitos esenciales de diseño, funcionamiento y seguridad, al igual que la mayoría de las aplicaciones evaluadas. Esto garantiza un servicio óptimo y atractivo visualmente para los usuarios.

A partir de estas comparaciones, se pueden identificar tanto ventajas como desventajas respecto a las otras aplicaciones. Entre las ventajas destaca la integración de características necesarias para

una aplicación centrada en informar respecto al ICA, con el objetivo de proporcionar un servicio de calidad que pueda convertirse en una herramienta de uso cotidiano, esencialmente en la ZMQ, con potencial para expandirse a nivel estatal y nacional. Esto permitirá ofrecer a la población información más detallada y en tiempo real sobre su entorno ayudando a proteger su salud.

En cuanto a las desventajas, la aplicación desarrollada carece de notificaciones o alertas sobre el ICA y está disponible únicamente para dispositivos Android. No obstante, presenta la ventaja de ser escalable, abriendo la posibilidad de implementar mejoras que amplíen su funcionalidad y su disponibilidad para usuarios en distintas ubicaciones sin importar la plataforma.

6. Conclusión

Una aplicación puede ser de gran importancia para el usuario, dependiendo de su objetivo y los resultados que pueda proporcionar referente al ICA. La aplicación debe ofrecer una solución integral y amigable para poder dar a conocer a cualquier individuo el nivel de ICA respecto a la zona en la que se encuentra, además de brindarle la información necesaria para poder entender de mejor forma cada termino y su importancia para con ello concientizar a la autocrítica de que un ICA alto puede ser extremadamente peligroso para las personas. Con esto y las características distintivas, así como el enfoque centrado al usuario para una fácil interacción y navegación, se puede convertir en una herramienta indispensable para todo ciudadano que principalmente viva en la ZMQ.

Por otra parte, se puede establecer que la aplicación desarrollada presenta muchas ventajas ante la mayoría de las aplicaciones seleccionadas, sin embargo, el diseño modular permite incorporar mejoras y proporcionar un servicio optimo a los usuarios, así como mayor precisión en los datos en tiempo real.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero brindado por parte del Instituto Politécnico Nacional, el CONAHCYT y PIFI - IPN.

Referencias

[1]. HealthPartners. (2024, 07 29). HealthPartners. From healthpartners.com: https://www.healthpartners.com/blog/air-quality-index/

[2]. Bayarsaikhan, T. (2022, 04 04). Noticias ONU. From news.un.org: https://news.un.org/es/story/2022/04/1506592

[3]. Institute, W. R. (2023, 09 07). World Resources Institute. From es.wri.org: https://es.wri.org/noticias/ahogan-contaminantes-7-de-cada-10-dias-del-ano-la-cdmx#:~:text=“En%202019%2C%20México%20registró%20más,la%20exposición%20a%20aire%20contaminado

[4]. Gutierrez, H. (2024). La importancia de los aplicativos móviles para aprender sobre arquitectura bioclimática en la academia. Revista de Arquitectura (Bogotá), 53-73.

[5]. Bermúdez, M. (2021). Importancia de las aplicaciones móviles. San José, Costa Rica: U San Marcos.

[6]. Garita, R. (2013). Tecnología Móvil: desarrollo de sistemas y aplicaciones para las Unidades de Información. Revista electrónica semestral, ISSN-1659-4142.

[7]. Arroyo, N. (2011). Informe APEI sobre movilidad. España: APEI.

[8]. Rincón, S., Barrios, G., Pérez, A., Garza, M., & Garza, M. (2023). El impacto de la facilidad percibida en el uso de aplicaciones móviles. Revista Iberoamericana de Ciencias, 149 - 161.

[9]. Bayarsaikhan, T. (2022, 04 04). Noticias ONU. Retrieved from news.un.org: https://news.un.org/es/story/2022/04/1506592

[10]. Labs, P. (2024). Purelogic Labs P. Retrieved from purelogic.in: https://purelogic.in

[11]. IQAir. (2024). IQAir. Retrieved from iqair.com: https://www.iqair.com

[12]. PlumeLabs. (2024). PlumeLabs by AccuWeather. Retrieved from plumelabs.com: https://plumelabs.com/en/

[13]. JB. (2019). JB STEVENARD - IOS SOFTWARE ENGINEER. Retrieved from jbstevenard.fr: https://jbstevenard.fr/my-aqi-air/

[14]. Inc, V. (2024). iOS & Android Developer. Retrieved from vnmobilesolutions.com: https://vnmobilesolutions.com

[15]. Chao, T. (2024). Apps Store. Retrieved from apps.apple.com: https://apps.apple.com/mx/app/taiwan-air-quality-index-aqi/id1351673955?l=en-GB

[16]. Jason. (2024). Application Development. Retrieved from lionscope.net: https://lionscope.net

[17]. Agency, V. (2024). Air Pollution Index. Retrieved from aqi.web.ipapps.vaybay.fr: https://aqi.web.ipapps.vaybay.fr

[18]. Foundation, E. S. (2019). App Store. Retrieved from apps.apple.com: https://apps.apple.com/mx/app/esf-hk-aqi/id1476914155?l=en-GB

[19]. LTD, Z. (2021). ZipoApps. Retrieved from zipoapps.com: https://zipoapps.com

[20]. Maps, & Charts. (2023). Privacy Policy. Retrieved from sites.google.com: https://sites.google.com/view/aqicn-pp/home

[21]. H2OPro. (2024). H2O Pro. Retrieved from h2oprotech.com: http://h2oprotech.com

[22]. Ravi, N. K. (2024). Air Quality (AQI). Retrieved from ravlogdeenan.weebly.com: https://ravlogdeenan.weebly.com/air-quality.html

[23]. Kaiterra. (2024). kaiterra. Retrieved from www.kaiterra.com: https://www.kaiterra.com

[24]. GOGET. (2024). Google Play. Retrieved from play.google.com: https://play.google.com/store/apps/dev?id=6653091282987742146

[25]. Systems, M. (2021). The AQI – Know Nearby Weather, Temperature & Air. Retrieved from shadabhashmi21: https://shadabhashmi21.github.io/matrix_systems_website/products/the-aqi/

[26]. LLC, E. (2017). eLecont. Retrieved from elecont.com: http://elecont.com

[27]. EEA. (2024). European Enviroment Agency. Retrieved from eea.europa.eu: https://www.eea.europa.eu/en/about/contact-us

[28]. AirCare. (2024). Air quality data you can trust. Retrieved from getaircare.com: https://getaircare.com

[29]. AirNow. (2022). AirNow FAQ Pages. Retrieved from usepa.servicenowservices.com: https://usepa.servicenowservices.com/airnow?id=ecss_airnow_csm_index_1

[30]. Airveda. (2022). Airveda. Retrieved from www.airveda.com: https://www.airveda.com

[31]. Gwaze, P., & Mashele, S. H. (2018). South African Air Quality Information System (SAAQIS) mobile application tool: bringing real time state of air quality to South Africans. Clean Air Journal, 3-3.

[32]. Bales, E., Nikzad, N., Quick, N., Ziftci, C., Patrick, K., & Griswold, W. (2012). Citisense: Mobile air quality sensing for individuals and communities Design and deployment of the Citisense mobile air-quality system. 6th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth) and Workshops, 155-158.

[33]. Patel, N., Bhavsar, Y., Mundra, S., Dharia, V., & Taware, R. (2022). Detection and Monitoring of Harmful Gases in Air Using a Microcontroller and Android App. Proceedings of International Conference on Wireless Communication. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, 315–324.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 22, pp. 323 - 338.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Prototipo de Guante APPC de Ayuda para Personas con Problemas de Comunicación

Frade Naja José Nathan, Quintanilla Martínez Erick Omar, ✉Alejandre Flores Marisol, Hernández Oliva Noemi y Soto Hernández Bruce.

Instituto Politécnico Nacional CECyT 2 Miguel Bernard, Maquinas con Sistemas Automatizados, Proyectos SIP 20242569 y SIP 20242197, Av. Nueva Casa de la Moneda 133, Colonia Lomas de Sotelo, CP 11200, Alcaldía Miguel Hidalgo, Ciudad de México, México.
✉ malejandref@ipn.mx

Resumen

En el presente trabajo se centra en la construcción de un guante adaptado con sensores de flexión conectados a una pantalla OLED y programado con una tarjeta electrónica de tipo Arduino Nano, este proyecto está diseñado específicamente para niños con discapacidad en el habla, que permite facilitar la comunicación básica mediante la traducción de gestos o movimientos de la mano en texto visible en la pantalla OLED. El guante está adaptado con sensores de flexión ubicados en cada uno de los dedos y cada dedo contiene un pictograma de alguna necesidad del niño con discapacidad de lenguaje, los sensores detectan la curvatura, movimientos de la mano y los datos recolectados son procesados por un Arduino Nano, por lo que el guante permitirá a los niños expresar necesidades básicas y de esta manera poder establecer un canal de comunicación con su entorno. Para este trabajo se controlaron las variables de los sensores de flexión y la pantalla OLED, realizando el ajuste de los parámetros necesarios para el correcto funcionamiento del guante, la programación de la tarjeta electrónica realiza la conversión de los datos de los sensores a datos digitales y de esta forma mostrara los mensajes por medio de la pantalla OLED, para que puedan ser visualizados por las personas de su entorno, lo que facilitara la comunicación de sus necesidades básicas, además de se puede adaptar el guante a las diferentes características de cada niño, este proyecto destaca por su compactibilidad y funcionalidad, proporcionando una herramienta práctica y eficaz para mejorar la comunicación de los niños con discapacidades en el habla.

Palabras clave: Sensores de flexión, Arduino nano, guante para discapacidad, problemas de comunicación verbal, pantalla OLED.

1. Introducción

Las estadísticas del Instituto Nacional de Estadísticas, Geografía e informática (INEGI) indican que, en México en el 2023, existen 129.5 millones de personas que habitan el país, donde 8.9 millones reporto tener una discapacidad en al menos una de las actividades sobre las cuales se indago, que el 2.8% presentan problemas con el habla y de comunicación. [1]

La Organización Mundial de la Salud (OMS) junto con la iniciativa Cooperación Global en Tecnología de Asistencia. (GATE por sus siglas en inglés) establecieron como un derecho universal el acceso y calidad a las tecnologías que mejoren las condiciones de las personas para llevar una vida sana, productiva, independiente y digna que les permita participar en la educación, en el mercado laboral y en la vida social. [2]

Por lo que la tecnología asistencial para personas con discapacidades de lenguaje ha evolucionado con el tiempo en México, esto gracias a que permiten y promueven la inclusión y la

participación de personas con alguna discapacidad, permitiendo mejorar el acceso a la tecnología de apoyo que engloba a los productos de apoyo y a los sistemas relacionados con ellos, esto permite contribuir el logro del desarrollo sostenible y asegurar que nadie se quede excluido.

Además, La comunicación es fundamental para el desarrollo social del ser humano. De hecho, la vida en comunidad no puede concebirse sin la facultad de acceder a la información que se genera en los diferentes entornos. Entre las diversas formas de comunicación, la expresión oral es la más común y acompaña a la persona, como herramienta de participación, durante su existencia.

Por lo que resulta relevante para el desarrollo de este trabajo, mencionar algunas investigaciones realizadas para la integración y construcción del guante de ayuda para personas con problemas de comunicación.

En [3] se desarrollo un guante tangible de bajo costo para traducir gestos de señas a voz y texto en idioma hindi, por lo que se consideró de esta investigación que el guante a construir fuera a bajo costo y se interpretaran los mensajes por medio de texto visualizado en una pantalla OLED.

En el año 2022 en [4] propusieron un sistema basado en sensores de flexión en los dedos, brindando 32 opciones de mensajes previamente programados, retomando de esta investigación el uso de los sensores de flexión y la programación de mensajes de texto.

En el 2021 se proponen guantes inteligentes, donde se menciona que son una solución rentable para ayudar a las personas con discapacidad auditiva y del habla a comunicarse sin depender de otros, ofreciendo oportunidades profesionales y contribuyendo a su progreso social [5]. Por lo que la aportación de esta investigación es poder ayudar a personas con discapacidad del habla.

Se crea el sistema “Smart Gloves” que facilita la comunicación en personas con discapacidades y adultos mayores, convirtiendo gestos a texto, detectando obstáculos para personas ciegas, y ofreciendo conectividad inalámbrica para emergencias, donde su objetivo es mejorar la calidad de vida y superar las barreras de comunicación. [6]

Los trabajos anteriores han dado pauta para poder determinar el uso de los sensores de flexión en cada uno de los dedos de la mano con mayor movilidad, así que cada dedo contenga un pictograma que sea de fácil relación para los niños con discapacidad de la comunicación del habla, la pantalla OLED que permita visualizar los mensajes de texto emitidos por el movimiento de los dedos, todo esto será programado y controlado por la tarjeta electrónica Arduino nano.

El presente articulo esta organizado de la siguiente forma: En la sección 2 se realiza un análisis del sistema propuesto del guante APPC. En la sección 3 se determinaron las variables de los sensores Flex y pruebas realizadas, en 4 análisis de resultados y en 5 se presentan las conclusiones de la implementación del guante.

2. Análisis del sistema propuesto para el guante APPC

Para la implementación del guante se requiere identificar el tipo de discapacidad que permita el uso del guante, por lo que deben de considerar las características y clasificación de algunas de estas discapacidades.

2.1 Discapacidades del habla y sus clasificaciones

Disartria: Es un trastorno del habla que se caracteriza por la dificultad para articular palabras debido a una debilidad, parálisis o falta de coordinación de los músculos que se utilizan para hablar. Estas dificultades pueden afectar la claridad, velocidad, ritmo y entonación del habla. [7]

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 22, pp. 323 - 338.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Apraxia del habla: Es un trastorno neurológico que afecta la capacidad de planificar y coordinar los movimientos musculares necesarios para el habla, implica una dificultad en la programación y secuenciación de los movimientos del habla, a pesar de que los músculos en si mismos funcionan correctamente. [8]

Dislalia: Es un trastorno de lenguaje que impide la articulación correcta en las personas. [9]

Disfonía: Es un trastorno de la voz que se manifiesta como una alteración en la calidad, el tono, el volumen o el esfuerzo necesario para hablar. [10]

Es importante considerar que estas condiciones pueden variar en gravedad y pueden ser tratadas de diversas formas, por lo que se consideraron este tipo de discapacidades en las que el prototipo funcione con los resultados deseados.

2.2 Descripción del prototipo del guante APPC

El guante fue desarrollado mediante una tecnología compuesta por sensores de tipo Flex que permiten ser programados con ayuda de una placa Arduino Nano, este tipo de sensores tienen la capacidad de captar la precisión de los movimientos específicos de los usuarios en tiempo real, lo que permite un proceso de análisis, lectura y traducción de estas señales, para que pueda ser interpretado de manera instantánea por los gestos o movimientos de los usuarios. La información obtenida es procesada por medio de mensajes de texto en una pantalla de tipo OLED incorporada en el guante. Esta pantalla actúa como un medio de comunicación directa, mostrando mensajes claros y concisos que reflejan los gestos realizados.

En la Figura 1 se muestra el diagrama a bloques de las etapas por las que son procesadas las señales enviadas a través del guante.

Figura 1. Diagrama de bloques del funcionamiento del guante.

Una ventaja significativa, es que permite que los gestos de las manos sean fácilmente comprendidos por cualquier persona en el entorno del usuario. El prototipo está conformado por una pantalla OLED que permite la visualización de los mensajes por medio de texto que permitan la comunicación de las necesidades básicas del usuario hacia las personas que están a su alrededor. La principal utilidad de esta tecnología es mejorar la comunicación y la expresión de las necesidades básicas de aquellos que puedan tener dificultades para comunicarse verbalmente.

En la Figura 2, se presenta el diagrama de flujo del funcionamiento de todo el prototipo. Al iniciar el proceso se toma la lectura de la resistencia variable en función del grado de curvatura de los sensores Flex y se compara la lectura con el valor declarado, si alguno de ellos no coincide regresa al inicio y si coincide el mensaje se enviará a la pantalla OLED.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 22, pp. 323 - 338.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

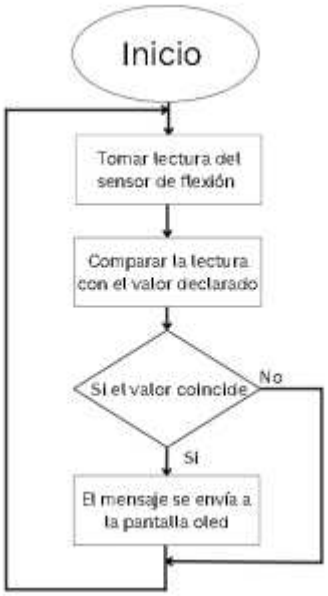


Figura 2. Diagrama de flujo del funcionamiento del guante.

El prototipo está integrado por las conexiones eléctricas electrónicas mostradas en la Figura 3, los sensores Flex están colocados en cada dedo del guante de tela negra, estos están conectados directamente a la tarjeta electrónica Arduino Nano y a la pantalla OLED que permite visualizar los mensajes enviados por medio del movimiento de cada uno de los dedos para comunicar las necesidades básicas de los niños con discapacidad en el habla.

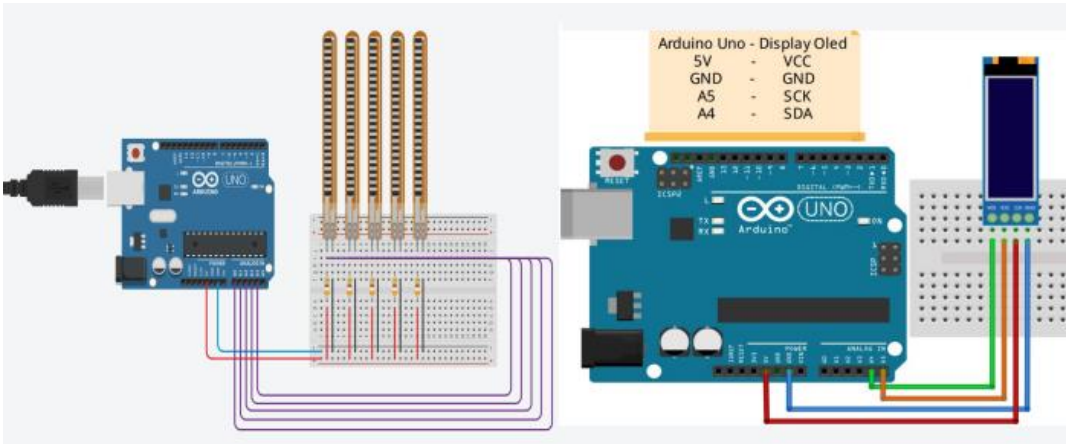


Figura 3. Diagrama de conexiones eléctricas electrónicas de los sensores y la pantalla OLED
Fuente: Autoría propia.

2.3. Sistema electrónico

2.3.1 Arduino Nano

El controlador requerido para la lectura de las señales analógicas emitidas por los sensores Flex para la interpretación de los movimientos del guante APPC que cumple con las características de compactibilidad y funcionalidad, por lo que se utilizó una placa de desarrollo Arduino Nano, el cual contiene la programación requerida para cumplir la adquisición y procesamiento de las señales. De forma general en la Tabla 1 se presentan las principales características de este.

Tabla 1. Características Técnicas de Arduino Nano.

Microcontrolador	ATmega328P.
Velocidad del reloj	16MHz
Voltaje de trabajo	5V
Voltaje de entrada	7-12 V (recomendado)
Pines de E/S digitales	14 pines digitales (6 PWM)
Pines de entrada analógica	8
Corriente DC por pin de E/S	20 mA (máx. 40 mA)
Memoria	32KB Flash (2KB para bootloader), 2KB RAM y 1KB eeprom.

2.3.2 Pantalla OLED

El OLED (Organic Light-Emitting Diode) es una tecnología de panel que no necesita retroiluminación, ya que cada píxel emite luz individualmente al recibir electricidad. Inicialmente, se fabricaban mediante gases de vapor en una cámara de vacío, pero ahora se usa la inyección de tinta por ser más económica y rápida. Los OLED utilizan compuestos orgánicos, como el carbono, en su fabricación. Funcionan colocando capas delgadas de material orgánico entre dos conductores; al aplicar electricidad, emiten luz, un fenómeno llamado. electroluminiscencia". Esto permite obtener "negros puros", ya que los píxeles se apagan completamente en áreas donde no debe haber luz [11]. En la Figura 4 se observa una pantalla de tipo OLED que puede ser programada por la tarjeta electrónica Arduino Nano.

Figura 4. Pantalla OLED 128x32 pixeles

En el prototipo se planteo inicialmente utilizar una pantalla LCD por su facilidad de conexión y programación en el Arduino Nano, pero al realizar pruebas se presentó un inconveniente ya que se

requería que el prototipo fuera compacto, y la pantalla LCD es mucho más grande y requiere de más pines para su conexión, por lo que se optó como mejor opción la pantalla OLED de 128x32 pixeles.

A continuación, en la Tabla 2, se muestran las características técnicas de la pantalla OLED, la cual puede consultarse mas a detalle en [12].

Tabla 2. Características Técnicas de la Pantalla OLED.

Diagonal	0.91”
Resolución	128x32 píxeles
Monocromática	Azul
Tamaño	46.30 x 11.50 x 1.45 (mm)
Tamaño de la PCB	30.00 x 11.50 x 1,45 (mm)
Área activa	22.383 x 5.584 (mm)
Pixel Pitch	0.175 x 0.175
Pixel	0.159 x 0.159 (mm)
Interfaz	I2C
Driver	SSD1306

2.3.3 Sensores Flex

Un sensor Flex es un dispositivo que mide la flexión o deformación de un objeto. Consiste en una tira delgada y flexible con conductores eléctricos, al doblarse, la resistencia eléctrica de estos conductores cambia proporcionalmente al grado de flexión. Este cambio de resistencia se convierte en una señal de voltaje mediante un circuito eléctrico, que luego se interpreta digitalmente para determinar la cantidad de flexión. En la figura 5 se muestra los ángulos de flexión con los valores de resistencia aproximados.

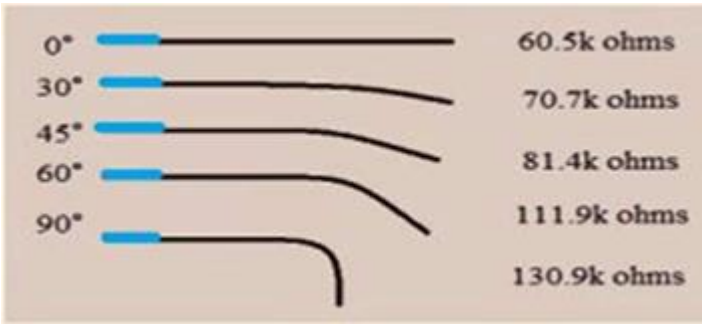


Figura 5. Ángulos de flexión con su valor óhmico

Los sensores Flex se utilizan en diversas aplicaciones como la robótica, dispositivos portátiles e industria médica. En la Figura 5 se muestra el sensor Flex.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 22, pp. 323 - 338.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

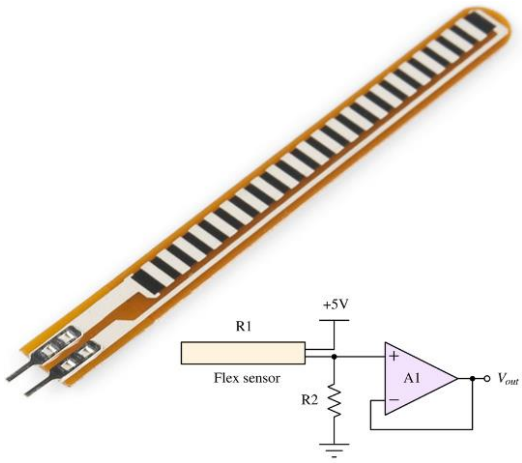


Figura 6. Sensor Flex

En la Tabla 3, se muestran las características técnicas del Sensor Flex utilizado.

Tabla 3. Características Técnicas del sensor Flex.

Medida	2.2”
Ciclo de vida	>1 millón de flexiones
Resistencia aplicada	25 kΩ
Resistencia a la flexión	45-125 Ω
Compatibilidad	Compatible con microcontroladores y sistemas de adquisición de datos que pueden leer señales de voltaje analógicas.
Material	Materiales flexibles como polímeros, con trazas conductoras de carbono o metal.
Potencia máxima	0.5W

3. Determinación de las variables para los sensores Flex y pruebas realizadas.

Las características del sensor Flex es que existe una resistencia variable impresa de carbono logrando un gran factor de forma en un sustrato delgado y flexible. Cuando el sustrato es doblado, el sensor produce una salida de resistencia correlacionada con la curva de la radio, cuando menor sea el radio o la curvatura, mayor será el valor de la resistencia. [13]

Existe un rango de deflexión en el sensor Flex que es la diferencia del Angulo máximo y mínimo en que se puede doblar al sensor, por lo que se determinaron valores para cada sensor que esta colocado en cada dedo de la mano con mayor movilidad, así como el mensaje que debe enviarse a la pantalla OLED.

Por lo que a partir del grado de flexión y del valor óhmico del sensor Flex, se determino un numero para cada movimiento de los dedos de la mano, así como el mensaje que será enviado una vez detectada la señal analógica y procesada por la tarjeta Arduino Nano para enviar y convertir la señal a digital y pueda ser visualizado el mensaje con el movimiento de cada dedo.

En la Tabla 4 se muestra el valor de sensibilidad de los sensores y los mensajes que serán enviados a la pantalla OLED.

Tabla 4. Sensibilidad de sensores y mensajes emitidos

Sensor	Valor	Mensaje
Sensor 1 (Pulgar)	<6 Valor permitido	Ayuda
Sensor 2 (Índice)	<7 Valor permitido	Tengo hambre
Sensor 3 (Medio)	<5 Valor permitido	Quiero Agua
Sensor 4 (Anular)	<8 Valor permitido	Quiero ir al baño
Sensor 5 (Meñique)	<8 Valor permitido	Emergencia

Los cálculos realizados para el diseño y construcción del guante APPC se muestran a continuación, estos permitieron una selección correcta de los elementos que integran el guante. Se calculo la tensión de los sensores para conocer el valor de las resistencias que se utilizaron, dicho modelo se presenta en la ecuación (1):

$$V_o \equiv V_{CD} \frac{R}{R + R_{flex}} \tag{1}$$

Donde:

$V_o = Tension\ de\ salida$
$V_{CD} = Alimentación\ a\ utilizar$
$R = Resistencia\ pull - down$
$R_{flex} = Resistencia\ del\ sensor$

Tension de salida por sensor

$$V_o \equiv 12V \frac{390\Omega}{390\Omega + 3.5K\Omega} \approx 1.184V \tag{2}$$

De la suma de las tensiones por sensor nos dio como resultado la tension total del circuito:

$$V_{oT} = (1.184V) * (5) \approx 5.92 \tag{3}$$

En la ecuación 2 se calculó la Tensión de salida por sensor, dando como resultado el valor de 1.184V por sensor, por lo que se realizo el calculo de la suma de las tensiones de los cinco sensores, obteniendo 5.92V como se muestra en la ecuación 3.

Por lo que a partir de los cálculos anteriores se realizó la selección de los componentes del guante APPC como se muestra en la Tabla 5 con las características técnicas mas relevantes.

Tabla 5. Especificaciones técnicas de los componentes

Elemento	Características técnicas
Arduino Nano	V_E 7.5-12v V_t 5v 14 pines digitales y 8 pines analógicos
Pantalla OLED	128x32 píxeles Alimentación: 3-5v Interfaz: I2C
Sensores Flex	2.2” R25kΩ
Alambre de cobre calibre 22	Amp_{max} 4.5 Temp: -60° hasta 300°
Cable tipo listón	Calibre 24 AWG Amp_{max} 5
Tabla fenólica	7x14.5 cm
Cable adaptador micro USB	Corriente soportada 2.4 A, 1.5m
Resistencias	390Ω
Power bank	Alimentación y voltaje de salida 5V 2 A 10,000 mAh

Una vez seleccionados todos los componentes que integran el prototipo, se realizó la programación utilizando el software de IDE de Arduino. En la Figura 7 se muestra parte del código de programación.

```
void loop() {
  //LEER VALORES DE SENSORES
  ValPulgar=analogRead(Pulgar);
  ValPulgar=map(ValPulgar,0,4095,0,180);
  ValIndice=analogRead(Indice);
  ValIndice=map(ValIndice,0,4095,0,180);
  ValMedio=analogRead(Medio);
  ValMedio=map(ValMedio,0,4095,0,180);
  ValAnular=analogRead(Anular);
  ValAnular=map(ValAnular,0,4095,0,180);
  ValMenique=analogRead(Menique);
  ValMenique=map(ValMenique,0,4095,0,180);
  //MOSTRAR MENSAJE INICIAL
  leer_oled();
  //CICLO PARA MOSTRAR FRASE DEL MEÑIQUE
  while(ValPulgar<6){
    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(WHITE);
    display.setCursor(35,10);
    display.println("AYUDA");
    display.display();
    ValPulgar=analogRead(Pulgar);
```

Figura 7. Código de programación del guante APPC

3.1 Pruebas de funcionamiento de los componentes del guante APPC

Para el diseño y construcción del guante APPC se realizaron diferentes pruebas a los elementos que integran el prototipo, lo que permitió realizar una prueba de validación final.

Se programaron cada uno de los sensores en la tarjera Arduino Nano por medio del software, donde se determino el grado de flexión de cada sensor, para enviar las señales analógicas a la tarjeta electrónica, en algunos sensores se hicieron diferentes ajustes en el grado de flexión para que

funcionara correctamente. En la Figura 8 se observa la conexión de los sensores y de la tarjeta Arduino Nano.

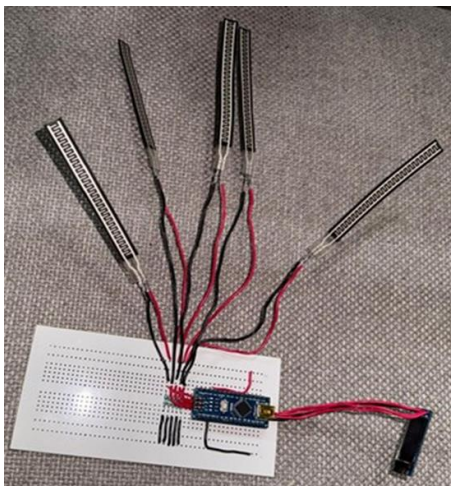


Figura 8. Prueba de sensores Flex con la tarjeta Arduino Nano

Se realizó la programación de la placa Arduino Nano para que pudiera enviar mensajes por medio de la pantalla OLED. Una vez programada se realiza en envío de señales y se observó que la pantalla recibiera las señales y mandara algún mensaje a la pantalla. Se logró la comunicación entre la placa y la pantalla, permitiendo la visualización de mensajes de texto en esta. En la Figura 9 se observa el desarrollo de la prueba.

Figura 9. Prueba de pantalla OLED

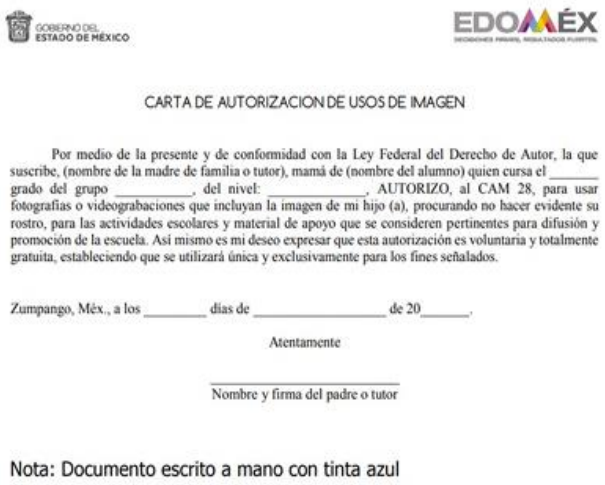
Una vez realizada la programación de la placa Arduino Nano, sensores tipo Flex y la pantalla OLED, se efectuaron pruebas de conexión en la tabla de pruebas protoboard, para observar que el circuito funcionara correctamente, es decir se enviaran las señales de los sensores a la pantalla por medio del movimiento de los dedos del usuario y que se visualizaran los mensajes de texto de las necesidades básicas programadas para este guante, comprobando el correcto funcionamiento y así realizar la conexión en la placa fenólica. Se logró que la prueba de funcionamiento de los elementos fuera correcta, por lo que se procedió a conectar en la placa fenólica. En la Figura 10 se observa el desarrollo de la prueba.

Figura 10. Prueba de sensores Flex y pantalla OLED

3.2 Prueba de Validación o de campo

Con el fin de poder validar en campo la efectividad y utilidad del guante APPC en casos con niños con algún padecimiento o discapacidad, se realizó el trámite para un acercamiento con un Centro de Atención Múltiple.

Las pruebas de validación se realizaron en el Centro de Atención Múltiple número 29 Dr. José de Jesús González, ubicado en CTC Pinturas en Zumpango, Estado de México. Se solicitó un documento de autorización por los padres de familia, en el cual firmaron de conformidad para aprobar el consentimiento y llevar a cabo las pruebas con el guante APPC en niños con diferentes padecimientos, como se observa en la Figura 11.



GOBIERNO DEL ESTADO DE MÉXICO

EDOMÉX

CARTA DE AUTORIZACION DE USOS DE IMAGEN

Por medio de la presente y de conformidad con la Ley Federal del Derecho de Autor, la que suscribe, (nombre de la madre de familia o tutor), mamá de (nombre del alumno) quien cursa el _____ grado del grupo _____, del nivel: _____, AUTORIZO, al CAM 28, para usar fotografías o videograbaciones que incluyan la imagen de mi hijo (a), procurando no hacer evidente su rostro, para las actividades escolares y material de apoyo que se consideren pertinentes para difusión y promoción de la escuela. Así mismo es mi deseo expresar que esta autorización es voluntaria y totalmente gratuita, estableciendo que se utilizará única y exclusivamente para los fines señalados.

Zumpango, Méx., a los _____ días de _____ de 20_____.

Atentamente

_____

Nombre y firma del padre o tutor

Nota: Documento escrito a mano con tinta azul

Figura 11. Documento de consentimiento para el uso de imagen de los niños

El procedimiento para la prueba en niños con discapacidad fue la siguiente: A cada niño se le explicó el funcionamiento del guante con pictogramas como se muestra en la Figura 12, que indicaban

la señal de cada dedo, una vez que se le explicaba cada mensaje se le preguntó cuál dedo tendría que mover para decir que Quiere Agua y una vez que indicaba cuál tendría que mover, se le ponía el guante para que hiciera la prueba.

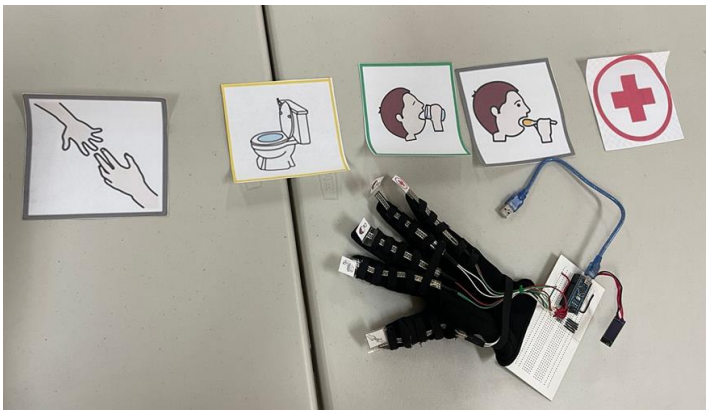


Figura 12. Pictogramas colocados en el guante APPC

A continuación, se muestra el diseño final ya montado en una chamarra para mayor comodidad para su uso, el diseño del guante por el que se optó, es un guante de tela color negro de medida estándar de una persona, en cada dedo se colocaron alrededor de 5 resortes horizontalmente para que sostuvieran a los sensores Flex. El circuito y las conexiones que se realizaron fue en una tabla fenólica tipo protoboard y con cable de tipo telefónico se unieron al guante.

Se integro a una chamarra de mezclilla, teniendo por dentro de una de las bolsas el circuito y el cableado por dentro del brazo dejando solo a la vista el guante y la pantalla se adhirió con velcro en el pecho dejando ver el mensaje, que el usuario quisiera comunicar como se muestra en la Figura 13.

Figura 13. Prototipo final integrado en una chamarra de mezclilla.

4. Análisis de resultados

Después del consentimiento dado por los tutores de los niños, se realizaron las pruebas de funcionamiento del guante con niños que sufren una discapacidad, donde se les explico como es el funcionamiento de este. A continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas.

Jorge Antonio A.G. de 14 años, con padecimientos diagnosticados de: síndrome de Down, **problemas de lenguaje**, miopía, astigmatismo, discapacidad intelectual. Resultado de la prueba: al usar el guante, Jorge mostró un entendimiento rápido de su uso después de haberle explicado por medio de pictogramas con el fin de que atendiera lo que indicaba cada dedo, como se aprecia en la Figura 14.

Figura 14. Resultado de la prueba Jorge

Fernando S.L. de 22 años, con padecimientos diagnosticados de: síndrome de Down, discapacidad intelectual, **dislalia**. Resultado de la prueba: cuando fue el turno de Fernando mostró un gran interés prestando mucha atención a la **explicación de los pictogramas** y cuando fue el momento de usarlo se le preguntaban qué dedos tendría que mover para ciertos mensajes y funcionamiento del guante fue el adecuado, como se aprecia en la Figura 15.

Figura 14. Resultado de la prueba Fernando

Rodrigo I.C. de 11 años, con padecimientos diagnosticados de: **Dislalia**, parálisis cerebral, estrabismo y retraso psicomotor tipo dispraxia nivel 4. Resultado de la prueba: al tener parálisis cerebral, Rodrigo no tenía un buen control de los movimientos de sus dedos, ya que, al intentar flexionar solo un dedo, los demás se flexionaban por igual. Por lo que para este tipo de paciente se **requeriría otro tipo de tecnología** para poder ayudar a la comunicación verbal.

Melanie M.C. de 14 años, con padecimientos diagnosticados de: **Dislalia**, síndrome de Cornelia de Langue. Resultado de la prueba: cuando Melanie usó el guante **encontró difícil el movimiento de alguno de sus dedos**, esto por su Síndrome, haciendo que sus manos sean más pequeñas de la normal, pero al paso del tiempo usándolo **encontró una forma de mover sus dedos**, las cuales respondían a lo que ella quería decir con el guante, como se muestra en la Figura 15.

Figura 15. Resultado de la prueba Melanie

Finalmente, con la implementación y validación del guante APPC en niños con padecimientos se comprobó que el guante APPC cumple con su **objetivo de ayudar a personas con alguna discapacidad del habla** y permite establecer canales de comunicación para sus **necesidades básicas**.

Al efectuar las pruebas se observó la gran barrera de comunicación que hay con estos niños que tienen más problemas a parte del problema de comunicación verbal, ya que la mayoría de las veces **que necesitan comunicar algo lo que hacen es balbucear sus necesidades**, fue por esto que se **optó por el uso de pictogramas** que se pegaron en cada dedo dependiendo del mensaje que este mandara a la pantalla y una vez que el niño entendiera el significado de cada pictograma se le ponía el guante para empezar las pruebas.

Por lo que el **uso de los pictogramas** en el guante fue un dato relevante para este pueda ser **utilizado con personas que sufren mas de una discapacidad** o que tienen limitantes mayores a los del habla, además de que las prueban fueron realizadas en niños, fue más fácil que entendieran el funcionamiento por medio de estos pictogramas.

El prototipo de guante APPC desarrollado para **brindar una opción en la comunicación para niños con discapacidades en el habla** se destaca por su **innovación tecnológica** en comparación con soluciones similares. A diferencia de los métodos tradicionales que no siempre proporcionan resultados precisos, este guante **permite una programación exacta y personalizada de los parámetros de detección**. El guante integra sensores de flexión que miden con precisión la curvatura de los dedos. Estos datos se procesan a través del Arduino Nano, que está programado para mostrar información relevante en una pantalla OLED. La interfaz gráfica, desarrollada en la plataforma Arduino, permite al usuario introducir y ajustar parámetros específicos como la sensibilidad de los sensores.

5. Conclusiones

En el presente trabajo se demostró que el uso del guante APPC, ayuda a personas con problemas de comunicación verbal, el diseño fue compacto y con la funcionalidad deseada para que diferentes personas puedan usarlo, esto se debió a que se realizó una adecuada selección de los

componentes y materiales a partir de sus características técnicas y de las pruebas realizadas a cada uno de los componentes y del prototipo.

La implementación del guante con sensores Flex conectados a una pantalla OLED programados con un Arduino Nano, presento varias dificultades, así como problemáticas al buscar romper barreras de la comunicación en niños con discapacidades o trastornos que los limitan para comunicarse, así como el entendimiento de su entorno. Con el fin de proponer una solución a este problema se hizo un estudio de enfermedades a la cual fue dirigido el guante y una recopilación de antecedentes, así como de los procesos de programación y conexión de los sensores y la pantalla.

Es importante mencionar que las personas que están alrededor, de las personas con limitaciones o discapacidades en el habla no saben lenguaje de señas y muchas veces es complicado el aprendizaje de este, por lo que este trabajo es una opción viable para comunicar las necesidades básicas de las personas con alguna enfermedad del habla por medio de la implementación del guante en su vida cotidiana.

Las pruebas realizadas en un contexto real cumplió con el objetivo de ser compacto y de fácil funcionamiento para las personas con limitaciones en el habla, también cumple con las necesidades detectadas en las investigaciones previas para determinar quién puede usar el guante, otra ventaja del prototipo es que se puede ajustar la sensibilidad individual de cada sensor directamente en el código del programa, ya que algunos niños en las pruebas no podían mantener sus dedos completamente flexionados.

Finalmente, una vez validado el guante de ayuda para personas con problemas de comunicación fue posible implementarlo en personas con limitantes en el habla y otras discapacidades que limitan su comunicación con las personas que están a su alrededor, es relevante mencionar que los parámetros de ajuste de la sensibilidad de los sensores Flex pueden modificarse de acuerdo a las características de movimiento de las personas que lo van a usar, así como los mensajes que se envían a la pantalla OLED, el guante puede ser colocado en cualquier tipo de prenda para mayor comodidad del usuario, solo la condicionante es que tenga manga larga para que no haya problemas con los cables que van de la tarjeta a la pantalla.

Agradecimientos los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional a través de la Secretaría de Investigación y Posgrado el apoyo otorgado por medio de los proyectos SIP20242569 y SIP20242197, también se agradece al primer y segundo autor, el trabajo desarrollado para la implementación del prototipo.

Referencias

[1] Comunicación social ENCUESTA NACIONAL DE LA DINÁMICA DEMOGRÁFICA (ENADID) 2023 1. (n.d.). https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2024/ENADID/ENADID2023.pdf

[2] Consumidor, del. (2024). Tecnologías asistenciales. Gob.mx. https://www.gob.mx/profeco/es/articulos/tecnologias-asistenciales?idiom=es

[3] Devi, S. and Deb, S. (2017). Low cost tangible glove for translating sign gestures to speech and text in hindi language. In 2017 3rd International Conference on Computational Intelligence Communication Technology (CICT), pages 1–5.

[4] Muralidharan, N. T., S. Rahul, R., R. Rohidh, M., M. Senthil, N., and M., E. H. (2022). Modelling of sign language smart glove based on bit equivalent implementation using flex sensor. In 2022 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET), pages 99–104.

[5] M, P., Balaji, V., R, T., and R, S. (2021). Sign speaks-an iot based smart gloves for dumb. In 2021 6th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), pages 470–475.

[6] Anisha, R., Nair, A., Shreya, A., Tharun, C., and Neethu, K. (2020). Design and implementation of smart gloves for the specially privileged. In 2020 Third International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAECC), pages 1–5.

[7] Mayo, C. (2024b). Afasia - síntomas y causas. https://www.mayoclinic.org/es/ diseases-conditions/aphasia/symptoms-causes/syc-20369518. Accessed: 2024-05- 29.

[8] NIH (2024). Apraxia del habla. https://www.nidcd.nih.gov/sites/default/files/ Documents/health/spanish/Apraxia-Spanish-508.pdf. Accessed: 2024-05-29.

[9] Europea, U. (2024). Dislalia: ¿Qué es, tipos y tratamiento? https://universidadeuropea. com/blog/dislalia/. Accessed: 2024-05-29.

[10] Clinica, U. d. N. (2024). Disfonía: qué es, causas, síntomas y tratamiento. https://www.cun. es/enfermedades-tratamientos/enfermedades/disfonia. Accessed: 2024-05-29.

[11] Nomada, S. (2024). Pantalla oled 128x32 [I2C]. https://nomada-e.com/store/interfaces/ 272-pantalla-oled-128x32-i2c-ssd1306-.html. Accessed: 2024-05-28.

[12] M. A. Al Rakib, M. S. Mahamud, M. S. R. Zishan and F. I. Abbas, "An Arduino Based Smart Hand Gloves for Load Control and Physician Notification," *2021 International Conference on Automation, Control and Mechatronics for Industry 4.0 (ACMI)*, Rajshahi, Bangladesh, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ACMI53878.2021.9528260.

[13] Flex sensor. (2022, December 29). Analog Circuit Design. https://analogcircuitdesign.com/flex-sensor/

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 23, pp. 339 - 349.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Construcción de un Sistema Robótico de Búsqueda y Monitoreo de Variables Fisiológicas

Peñaloza Mendoza Guillermo Rey, Flores Medina Pablo Jonatán, Becerra Tapia Víctor y Garibay Murillo Paola.

Departamento de Ingeniería Biomédica
TecNM – Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro
Pátzcuaro, Michoacán
grey@itspa.edu.mx

Resumen

En situaciones de emergencia, como desastres naturales, el acceso a información de variables fisiológicas de personas atrapadas en áreas de difícil acceso es crucial para una mejor toma de decisiones por cuerpos de rescate. Este artículo presenta el desarrollo de un sistema de Búsqueda y Monitoreo en tiempo real de Variables Fisiológicas al que se le atributen diseños de robots móviles de búsqueda, construidos para mejorar la localización y el monitoreo de signos vitales de las personas atrapadas. Equipado con terminales inalámbricas y sensores avanzados, el robot proporciona datos médicos en tiempo real, permitiendo a los equipos de rescate tomar decisiones informadas. El sistema incluye un módulo GPS y una cámara para mejorar la geolocalización y la captura de imágenes, con la consideración de mejorar la conectividad en zonas sin internet. La integración de esta tecnología en los robots móviles no solo facilita la localización y el monitoreo, sino que también mejora la eficacia de las operaciones de rescate, ofreciendo una solución significativa a los desafíos de la atención médica en emergencias.

Palabras clave: Búsqueda y monitoreo, Robot móvil, Robótica médica, Teleasistencia, Variables fisiológicas

1. Introducción

La aplicación de tecnología robótica y sistemas de monitoreo remoto en situaciones de emergencia ha demostrado ser una herramienta valiosa para mejorar la eficiencia y efectividad de las operaciones de rescate y atención médica. La literatura existente ofrece una amplia gama de investigaciones que respaldan esta afirmación y proporcionan un marco sólido para el desarrollo de proyectos innovadores en este campo.

Los trabajos como " Human-robot interaction in rescue robotics " de Robin M. Murphy [1] y " The current state and future outlook of rescue robotics" de J. Delmerico [2], destacan el papel que desempeñan los robots en la localización y el rescate de personas atrapadas en entornos peligrosos o de difícil acceso. Estos dispositivos pueden acceder a áreas inaccesibles para los equipos humanos, lo que los convierte en activos importantes en situaciones de desastre natural o emergencia.

En los artículos, "Telemedicine in the emergency department: an overview of systematic reviews" de A. Sharifi [3] y "Telemedicine for Patient Management in Remote Areas and Underserved Populations" de N. Mohammadzadeh [4], resaltan la importancia de desarrollar soluciones innovadoras para superar las barreras y garantizar la atención médica oportuna y efectiva a las personas afectadas. La integración de tecnologías de telemedicina y monitoreo remoto en operaciones de rescate amplía aún más las posibilidades de proporcionar asistencia médica en entornos adversos, haciendo uso del monitoreo de signos vitales, que ofrece la capacidad de obtener

datos médicos en tiempo real de pacientes en ubicaciones remotas o de difícil acceso [5]. La integración de estos dispositivos en robots móviles permite a los equipos de rescate obtener información vital sobre el estado de salud de las personas atrapadas, facilitando así la toma de decisiones informadas y la coordinación de las operaciones de rescate.

Para el desarrollo de estos sistemas se hace uso de sistemas embebidos y proyectos de Internet de las cosas (IoT), la interconexión entre dispositivos es fundamental para lograr funcionalidades avanzadas y una mayor flexibilidad en el diseño de soluciones. Uno de los aspectos clave en la integración de estos dispositivos es la selección y configuración adecuada de los protocolos de comunicación, es crucial considerar los aspectos legales y éticos relacionados con el uso de esta tecnología en situaciones de emergencia [6]

2. Consideraciones Técnicas

México es uno de los países más afectados por desastres naturales en el mundo, debido a su ubicación geográfica y condiciones climáticas. De acuerdo al Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), en 2020, México enfrentó 438 desastres de origen natural que han causado la muerte de 392 confirmadas y han afectado a millones de habitantes, además de causar pérdidas económicas por más de 32 mil millones de pesos [7].

Ante estos escenarios se desarrollan protocolos para tener una mejor respuesta, en México, la gestión y respuesta ante desastres naturales están regidas por la Ley General de Protección Civil y coordinadas por el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) [8]. Este sistema, encabezado por la Secretaría de Gobernación (SEGOB) a través de la Coordinación Nacional de Protección Civil (CNPC), establece protocolos específicos para enfrentar emergencias y desastres, con la colaboración de diversas entidades gubernamentales, organizaciones no gubernamentales (ONGs), y la sociedad civil. Para comprender mejor estos protocolos se puede observar la Figura 1, que representa este protocolo de rescate como un diagrama de 5 fases o etapas consecutivas desde la prevención y preparación para un desastre hasta la recuperación del mismo.

De esta construcción del protocolo, se parte de la fase 3 Búsqueda y Rescate para el desarrollo del presente trabajo, haciendo especial énfasis en la búsqueda, por lo tanto, según el seguimiento del protocolo en su fase 3 solicita:

- Evaluación Inicial del Sitio: Evaluación rápida del área afectada para determinar el alcance del desastre y las áreas prioritarias de intervención.
- Despliegue de Equipos de Búsqueda y Rescate: Utilización de equipos especializados, incluyendo unidades caninas, drones y robots de rescate para la localización de víctimas.
- Operaciones de Búsqueda y Rescate: Implementación de técnicas de búsqueda en estructuras colapsadas, inundaciones y otras situaciones de emergencia.
- Teniendo aun mayor relevancia en el despliegue de equipos de búsqueda y en la implementación de técnicas de búsqueda en estructuras colapsadas

2.1 Importancia del tiempo en las operaciones de búsqueda

El tiempo es un factor crítico en las operaciones de rescate, ya que las posibilidades de supervivencia de las víctimas disminuyen considerablemente con el paso del tiempo después de un desastre. Según estudios y experiencias documentadas, las primeras 72 horas, conocidas como la "ventana dorada", son fundamentales para maximizar las tasas de supervivencia. Durante las primeras horas tras un desastre, las víctimas tienen mayores probabilidades de sobrevivir debido a la disponibilidad de oxígeno y la respuesta inmediata de los equipos de rescate. Sin embargo, a medida que pasa el tiempo, las condiciones adversas como la falta de agua, alimentos, y la exposición a temperaturas extremas pueden comprometer seriamente la salud de las personas atrapadas [9].

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 23, pp. 339 - 349.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Los robots de rescate, equipados con cámaras, sensores y capacidades de movimiento autónomo, representan una innovación crucial. Estos dispositivos pueden penetrar en áreas peligrosas y de difícil acceso, buscando y localizando víctimas más rápidamente que los métodos tradicionales [1]. La capacidad de estos robots para operar en entornos hostiles y ofrecer información visual en tiempo real es fundamental para la toma de decisiones informadas durante las operaciones de rescate [2,10].

Por otro lado, los sistemas de monitoreo remoto, utilizando dispositivos portátiles y tecnología inalámbrica, permiten a los equipos de rescate evaluar continuamente los signos vitales de las víctimas desde una distancia segura. Esto incluye la medición de parámetros como la frecuencia cardíaca, la saturación de oxígeno y la temperatura corporal [11].

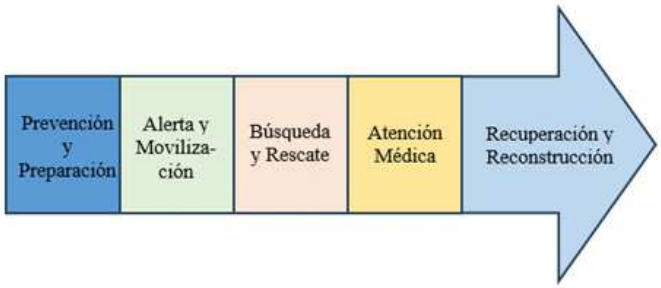


Figura 1. Fases del protocolo de rescate.

2.2 Importancia de los Signos Vitales en Operaciones de Rescate

Durante operaciones de rescate, la monitorización de los signos vitales juega un papel fundamental en la evaluación y atención médica de las víctimas. Signos como la frecuencia cardíaca, la saturación de oxígeno en sangre (SpO2) y la temperatura corporal son indicadores cruciales del estado de salud de una persona, especialmente en entornos de emergencia [6, 12].

La monitorización continua de los signos vitales proporciona datos precisos sobre la condición médica de las víctimas, facilitando la toma de decisiones informadas sobre el tratamiento necesario. Esta información es esencial para ajustar las estrategias de rescate y asegurar que se implementen los cuidados médicos adecuados de manera oportuna. Esto permite a los equipos de rescate priorizar sus intervenciones, asegurando que los cuidados críticos se brinden a quienes más los necesitan.

3. Planteamiento del problema y solución propuesta

En situaciones de emergencia y desastres naturales, la eficacia de las operaciones de rescate depende crucialmente de la capacidad para localizar rápidamente a las víctimas y proporcionar atención médica oportuna. Actualmente, existen tecnologías separadas para la búsqueda y el monitoreo de signos vitales en entornos difíciles, como robots de búsqueda y dispositivos de monitoreo remoto. Sin embargo, la integración efectiva de ambas capacidades en un solo sistema integral aún no se ha logrado plenamente. Los robots de búsqueda están diseñados para penetrar en áreas peligrosas y de difícil acceso, utilizando cámaras y sensores para detectar víctimas bajo escombros o en entornos colapsados. Por otro lado, los dispositivos de monitoreo remoto permiten la evaluación continua de signos vitales como la frecuencia cardíaca, la saturación de oxígeno y la temperatura corporal desde una distancia segura. A pesar de estos avances, la falta de un sistema integrado que combine ambas funcionalidades impide una respuesta más efectiva y coordinada en situaciones críticas.

La ausencia de un sistema que permita a los equipos de rescate localizar rápidamente a las víctimas mientras monitorean sus signos vitales en tiempo real representa un obstáculo significativo, lo que se traduce en tiempos prolongados de respuesta, mayores riesgos para las víctimas atrapadas y una utilización por debajo de sus capacidades de recursos durante las operaciones de rescate.

Es por ello que se propone desarrollar un sistema que involucra el uso de robots móviles equipados con terminales inalámbricas para el monitoreo de signos vitales, así como un sistema integral que combine tecnologías de robótica y telemedicina. El desarrollo involucra dos fases, siendo la primera el diseño de un robot móvil ágil capaz de navegar en terrenos difíciles y acceder a áreas peligrosas.

La segunda fase consta del manejo de la información recopilada por el robot siendo entregada al operador; la información a emplear es imagen por cámara para la localización visual de víctimas en entornos complejos como escombros o estructuras colapsadas, datos de posicionamiento GPS y el monitoreo continuo de signos vitales clave como la frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno y temperatura corporal, en tiempo real

4. Desarrollo de la propuesta

El desarrollo de la propuesta se ha estructurado en varias etapas que abarcan el diseño y construcción del sistema robótico, la implementación de protocolos de comunicación de bajo consumo para la operación de las terminales inalámbricas, la transmisión de imagen, el posicionamiento global y la unidad central de monitoreo.

4.1 Diseño y Construcción del sistema robótico de búsqueda y rescate

De acuerdo con la directora del CRASAR (Center for Robot-Assisted Search and Rescue), Robin R. Murphy, que cuenta con participación en más de once desastres mundiales, las funciones en las que pueden intervenir los robots de inspección, búsqueda y rescate son: labores de inspección y reconocimiento o acciones de intervención sobre el entorno [13]. Actualmente, los principales sistemas robóticos para búsqueda y rescate deben cubrir diferentes aspectos como entrar, conducir y bajarse de un vehículo, desplazarse por terrenos no nivelados y de diferentes condiciones superficiales, atravesar puertas e incluso sofocar un incendio [1, 2]. Además, deben cubrir habilidades de los humanos ya que el elemento fundamental de los equipos de rescate en sus misiones es localizar víctimas y auxiliarlas.

En base a lo anterior, se establecen las características deseadas en el diseño y se muestran en la Tabla 1, las cuales se orientan a poder cubrir las dos funciones de intervención, la primera sobre inspección y reconocimiento cuyo objetivo es localizar víctimas y elementos potencialmente peligrosos, la segunda sobre intervenir dando asistencia médica.

Tabla 1. Características del sistema robótico.

Característica	Descripción
Funciones	Búsqueda de víctimas y atención médica
Tipo de robot	Móvil con orugas
Dimensiones	10 cm x 10 cm de largo x 7 cm de alto
Control	Radiofrecuencia
Reconocimiento	Cámara
Localización	GPS
Parámetros de medición	Temperatura, frecuencia cardiaca y oxigenación

El diseño integral del vehículo en 3D se realizó en el software Fusion 360, donde además de las características de la Tabla 1, se consideraron aspectos de movilidad, resistencia y versatilidad en terrenos adversos considerando las dimensiones que permitan la habilidad de operar en terrenos de desastre, esto da como resultado el cuerpo del robot mostrado en la Figura 2.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 23, pp. 339 - 349.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

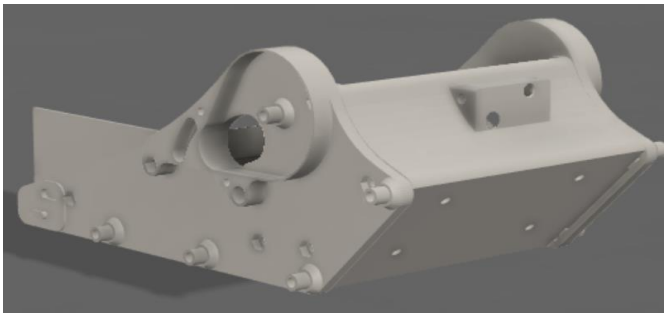


Figura 2. Chasis del robot móvil

Teniendo el diseño finalizado, el prototipado se llevó a cabo utilizando tecnología de impresión 3D con diversos materiales, incluyendo PLA, ABS y PETG. Se realizaron pruebas con estos materiales exclusivamente para cuestiones de prototipado, así mismo, el tamaño del prototipo emplea una escala 3:1 con respecto al diseño, esto para facilitar la implementación, sin embargo, en una aplicación final se debe implementar el diseño en escala real y con materiales de manufactura con mejor resistencia. Para lograr el movimiento se implementaron motores brushless con engranes tal como se observa en la Figura 3, para transmitir el movimiento a las orugas. El sistema de iluminación, linternas LED, garantiza la visibilidad en entornos oscuros y confinados. Además, se integraron sensores para detectar obstáculos y asegurar una navegación eficiente y segura del robot en zonas de desastre.

Se integró un sensor infrarrojo de alta precisión para la detección de personas atrapadas bajo escombros, además de una tarjeta ESP CAM que combina un microcontrolador ESP32 con una cámara, permitiendo capturar y transmitir imágenes y videos en tiempo real. La tarjeta ESP CAM es compacta, asequible y eficiente en términos de energía, lo que la hace ideal para aplicaciones en sistemas embebidos. Permite la transmisión de video en tiempo real, lo que es crucial en situaciones de rescate donde el equipo necesita visualizar el entorno del robot para tomar decisiones rápidas y efectivas. Su capacidad de conexión Wi-Fi permite adquirir la imagen mediante una red adhoc sin necesidad de internet.

4.2 Desarrollo de terminales inalámbricas

El diseño de las terminales que alojan los sensores para la lectura de oxigenación, temperatura y frecuencia cardiaca debe ser portátil para el usuario, asegurando que sean cómodas y eficientes para el monitoreo continuo de sus signos vitales en situaciones de emergencia, por lo cual se basa en un dedal médico, como se muestra en la Figura 4.

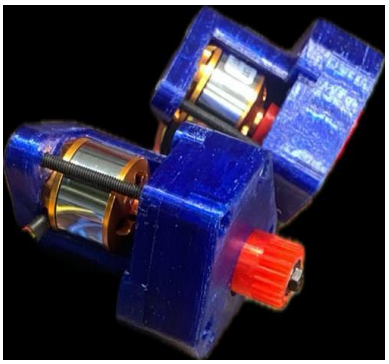


Figura 3. Sistema de transmisión de movimiento a las orugas

Cada terminal utiliza una tarjeta ESP32 que se equipó con un sensor MAX30102 que permite la medición continua de la frecuencia cardíaca y la saturación de oxígeno en sangre (SpO2), esto es mostrado en la Figura 5. El sensor MAX30102 utiliza tecnología óptica para detectar y medir las

variaciones en la luz absorbida por el flujo sanguíneo en los capilares, lo que permite obtener lecturas precisas y confiables de la frecuencia cardíaca y los niveles de oxígeno. Para la medición de temperatura se implementa el termistor MLX90614.

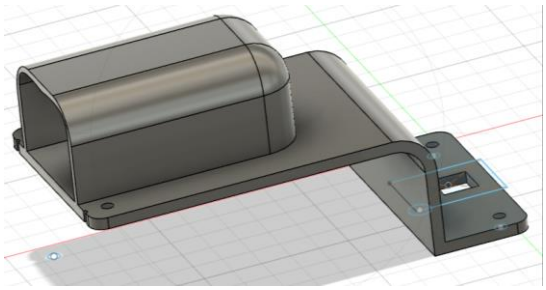


Figura 4. Diseño de terminal inalámbrica para colocar en el dedo

Adicionalmente, se integró un módulo para la toma de presión arterial que se comunica con la unidad central a través del protocolo MQTT. Este módulo no se considera esencial en los protocolos de búsqueda y rescate, sin embargo, es considerado como un signo vital de importancia al brindar los primeros auxilios [14].

El sistema mostrado en la Figura 6, utiliza el método auscultatorio, que se basa en la detección de los sonidos de Korotkoff para determinar con precisión la presión sistólica y diastólica. Al detectar estos sonidos, se toma la lectura del sensor MPS20N0040D que determina la presión arterial.

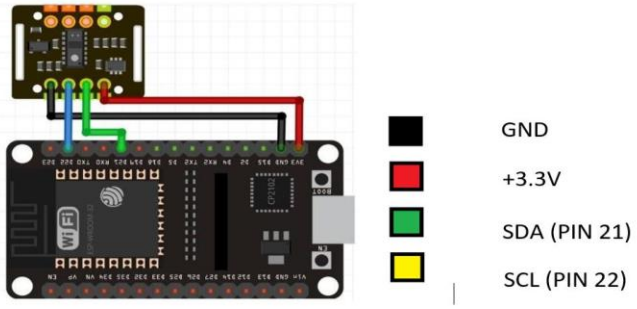


Figura 5. Conexión del sensor MAX30102 con la ESP32 en la terminal inalámbrica.

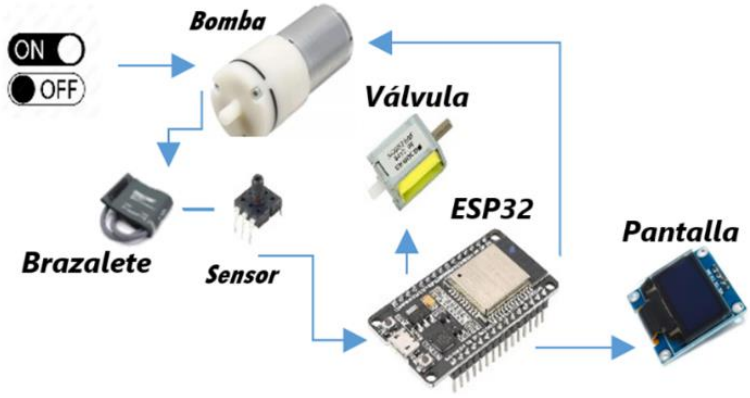


Figura 6. Diagrama del sistema de medición de presión arterial.

4.3 Obtención de la posición

Para la obtención de la posición del robot móvil se incorpora el módulo GPS NEO-6M a la tarjeta ESP32, se procede a realizar la conexión física del módulo GPS NEO-6M a la tarjeta ESP32. Esta conexión implicó conectar los pines de transmisión (TX) y recepción (RX) del módulo GPS a los

pines correspondientes de la ESP32. Se utilizó el entorno de desarrollo Arduino para programar la tarjeta ESP32. Se importó la biblioteca necesaria para el módulo GPS NEO- 6M y se configuraron los pines de comunicación serial en el código. Se llevó a cabo la inicialización del módulo GPS NEO-6M mediante el envío de comandos AT apropiados para configurar sus parámetros, como la tasa de actualización y el modo de funcionamiento. Se configuró la ESP32 para recibir los datos enviados por el módulo GPS NEO-6M a través de la comunicación serial. Se implementó la lectura de los datos recibidos y su procesamiento para su posterior interpretación.

4.4 Implementación de la unidad central de monitoreo

La unidad central está diseñada para que el encargado de la búsqueda y rescate monitorice la información que el robot está obteniendo del usuario víctima. Esta unidad está equipada con una pantalla de 7 pulgadas, montada en la carcasa mostrada en la Figura 7, diseñada en Fusion 360. Esta carcasa aloja una Raspberry Pi 4 junto con sus periféricos, incluyendo un teclado con touchpad para facilitar el manejo de la interfaz del sistema. Además, se incorpora una bocina para la emisión de alarmas de audio.

Figura 7. Diseño de la unidad central.

Los datos recolectados por las terminales inalámbricas son enviados a la unidad central mediante el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). MQTT es un protocolo ligero de mensajería diseñado para conexiones remotas que requieren una cantidad mínima de recursos y es ideal para dispositivos IoT (Internet of Things). Cada una de las terminales de lectura utiliza una tarjeta ESP32 para la comunicación de datos. Estas tarjetas se conectan a la red mediante IPs específicas y transmiten los datos de los sensores utilizando MQTT. Una vez que los datos son enviados desde las terminales, son recibidos por una Raspberry Pi que actúa como la unidad central. La Raspberry Pi está programada con Python para gestionar la recepción de datos. Para mostrar de manera gráfica los datos recibidos, se desarrolló una interfaz gráfica utilizando la librería Tkinter de Python.

La interfaz permite visualizar en tiempo real las lecturas de frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno y presión arterial de las personas atrapadas, facilitando así la toma de decisiones durante las operaciones de rescate. El algoritmo usado para la transmisión de los datos obtenidos directamente de los sensores en el dedal con la ESP32 a un script de Python en la Raspberry pi4 está mostrado en el diagrama de la Figura 8.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 23, pp. 339 - 349.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

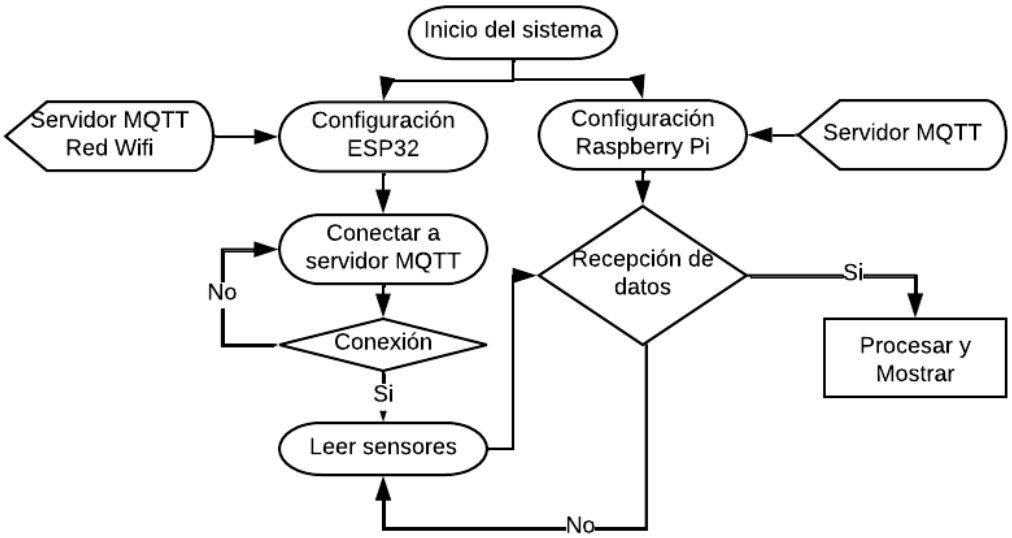


Figura 8. Algoritmo de la comunicación entre las terminales inalámbricas y la unidad central.

5. Resultados

El sistema, que incluye un robot móvil para la localización de personas atrapadas, terminales inalámbricas para el monitoreo remoto de los signos vitales de dichas personas, y una unidad central que recopila y procesa estos datos, ha demostrado ser altamente eficiente en la recepción y transmisión de información en tiempo real. La unidad central recibe datos de múltiples individuos y proporciona información crucial para la toma de decisiones por parte de los rescatistas, el montaje de los elementos en la terminal central se observa en las Figuras 9 y 10. La eficiencia del sistema en la recepción de datos en tiempo real se evidencia en los resultados presentados en la Tabla 2.

Figura 9. Componentes internos en la terminal central.

Figura 10. Montaje del teclado y mouse en la terminal central

5.1 Movilidad del sistema robótico

El vehículo de búsqueda y rescate final se muestra en la Figura 9, este ha demostrado una excelente movilidad en entornos desafiantes. Durante las pruebas, el vehículo fue capaz de operar eficazmente en terrenos con grava, escombros y superficies lisas, así mismo en condiciones con inclinaciones menores de 50° presenta buen agarre a la superficie, sin embargo, en pendientes con inclinación superior la adherencia disminuye considerablemente. El robot, diseñado con dimensiones compactas, demostró una notable capacidad para maniobrar en espacios confinados y difíciles de alcanzar. El tamaño del robot beneficia la agilidad y capacidad de movimiento en entornos difíciles. Los motores y las ruedas tipo oruga permitieron al robot navegar con mayor facilidad a través de escombros y obstáculos simulados. La comunicación de datos y control del robot presenta buenos resultados, logrando obtener respuesta a más de 50 m de distancia con muros entre emisor y receptor, tal como se muestra en la Tabla 2.

5.2 Detección de personas

La incorporación de linternas LED y un sensor infrarrojo en el vehículo ha mejorado significativamente su capacidad para detectar personas en entornos de baja visibilidad, como reas oscuras o con polvo. Este avance aumenta la probabilidad de localizar a personas atrapadas de manera más efectiva, facilitando una respuesta rápida y adecuada por parte del equipo de rescate. Además, el uso de la ESP-CAM permite la visualización del entorno en todo momento en la unidad control como se ve en la Figura 10.

Tabla 2. Alcance de transferencia de datos en múltiples entornos.

Prueba	Entorno	Condición	Distancia	Retardo
1	Hospital	Edificio de un piso con muros de concreto	47 m	< 2 s
2	Urgencias	Muros de concreto	40 m	< 2 s
3	Ambulancia	Vehículo en movimiento	1.5 m	< 1 s
4	Instalación deportiva	Espacio con metal y muros de tabla roca	54 m	< 5 s
5	Zona rural	Pocos obstáculos	32 m	< 2 s

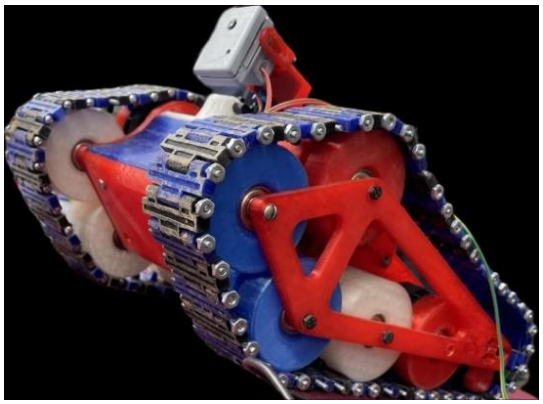


Figura 9. Fotografía del robot móvil con orugas y la implementación de la cámara.

Figura 10. Visualización de la imagen que toma el robot móvil sobre la interface.

5.3 Mediciones de signos vitales

Las terminales inalámbricas portátiles equipadas con sensores MAX30102 han otorgado mediciones precisas de la frecuencia cardíaca y la saturación de oxígeno en sangre (SpO2), con un margen del 2% de error máximo en las dos lecturas. El uso del termistor para medir la temperatura corporal en la axila de igual manera ha dado información precisa, sin embargo, requiere de 3 minutos

para estabilizar la lectura. En la Figura 11 se observa la lectura de los sensores de manera numeral y gráfica, en color verde se muestran los datos dentro de los rangos normales y en rojo los datos que se consideran fuera de un rango saludable.

5.4 Protocolo de comunicación

El protocolo MQTT es eficiente en la transmisión de datos biomédicos en tiempo real. Cada terminal de lectura utiliza una tarjeta ESP32 para la comunicación de datos, conectándose a la red mediante IPs específicas. La capacidad de comunicarse en entornos con estructuras de concreto y una distancia máxima de 47 metros es un logro significativo. Así mismo, la distancia máxima supera los 50 m con respecto a la ubicación de la unidad central y un tiempo menor a 5 segundos en la transmisión de datos más lenta. Estos datos son presentados en la Tabla 2. La Raspberry Pi 4 ha proporcionado una plataforma sólida para el procesamiento y la gestión de datos. Las aplicaciones y scripts desarrollados en Python permiten el procesamiento eficiente de los datos biomédicos recibidos y la representación visual en tiempo real.

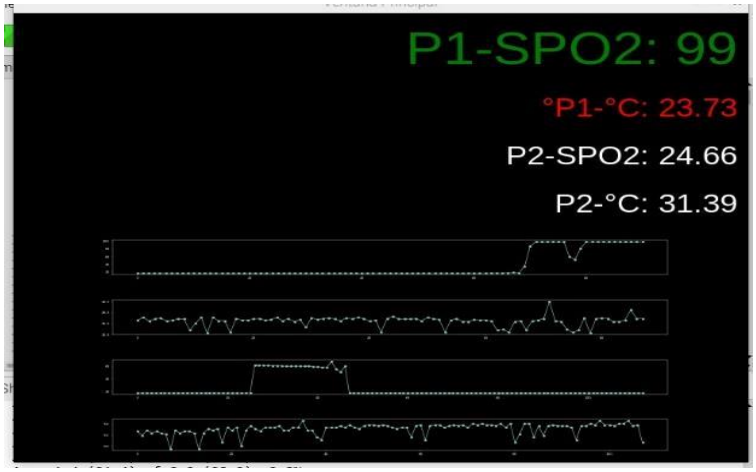


Figura 11. Interfaz en Tkinter donde se muestran los parámetros fisiológicos.

La interfaz gráfica desarrollada con la librería Tkinter permite visualizar en tiempo real las lecturas de frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno y presión arterial, tal como se muestra en la Figura 12, facilitando la toma de decisiones durante las operaciones de rescate además en la unidad central se visualiza la posición del robot y un mapa de puntos generado por la trayectoria de robot para la ubicación en terrenos destruidos, en la interfaz también se muestra la cámara que porta el robot móvil para su manejo.

Figura 12. Unidad central con visualización de signos vitales, cámara y GPS.

6. Conclusiones

El sistema de búsqueda y rescate radiocontrolado demostró ser efectivo en la localización y monitoreo de personas en zonas remotas, realizadas en entornos controlados y simulados. La inclusión de linternas LED y un sensor infrarrojo mejoró significativamente la detección, incluso en condiciones adversas. Las terminales portátiles equipadas con sensores MAX30102 y termistores proporcionaron mediciones biomédicas precisas, permitiendo una atención médica informada y oportuna. La comunicación a través del protocolo MQTT y la centralización de datos en una Raspberry Pi 4 garantizaron una transmisión confiable y un procesamiento eficiente de la información. Este sistema representa un avance significativo en la capacidad de respuesta ante desastres y situaciones críticas, mejorando la posibilidad de supervivencia de las personas atrapadas. Sin embargo, se reconocen desafíos futuros, como fortalecer la seguridad de los datos transmitidos y mejorar la interoperabilidad con otros dispositivos de monitoreo médico. Estas mejoras continuarán siendo objeto de investigación y desarrollo para optimizar aún más la eficacia de este sistema en la atención de emergencias médicas.

Referencias

[1] Murphy, R. R., "Human-robot interaction in rescue robotics," in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), vol. 34, no. 2, pp. 138-153, May 2004, doi: 10.1109/TSMCC.2004.826267.

[2] Delmerico, J.; Mintchev, S.; Giusti, A.; Gromov, B.; Melo, K.; Horvat, T.; Cadena, C.; Hutter, M.; Ijspeert, A.; Floreano, D.; et al. The Current State and Future Outlook of Rescue Robotics. J. Field Robot. 2019, 36, 1171–1191.

[3] Sharifi Kia, A., Rafizadeh, M. & Shahmoradi, L. Telemedicine in the emergency department: an overview of systematic reviews. J Public Health (Berl.) 31, 1193–1207 (2023). https://doi.org/10.1007/s10389-021-01684-x.

[4] Mohammadzadeh, N., Rezayi, S. and Saeedi, S., “Telemedicine for Patient Management in Remote Areas and Underserved Populations,” Disaster Medicine and Public Health Preparedness, vol. 17, p. e167, 2023. doi:10.1017/dmp.2022.76.

[5] Bashi N, Karunanithi M, Fatehi F, Ding H, Walters D., “Remote Monitoring of Patients With Heart Failure: An Overview of Systematic Reviews”. J Med Internet Res 2017;19(1):e18. doi: 10.2196/jmir.6571

[6] Jha, A., Athanerey, A. & Kumar, A. Role and challenges of internet of things and informatics in Healthcare research. Health Technol. 12, 701–712 (2022). https://doi.org/10.1007/s12553-022-00661-y

[7] Secretaría de seguridad y protección ciudadana. Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en méxico. Resumen ejecutivo 2020. D. R. Versión Electrónica, junio de 2021.

[8] Morán Escamilla, J. D. Panorama del Sistema Nacional de protección Civil en México. Revista de El Colegio de San Luis, Nueva época. Año VII, número 13, enero a junio de 2017, El Colegio de San Luis.

[9] Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. “5 essentials for the first 72 hours of disaster response”. OCHA. Accedido el 18 de enero de 2024. [En línea]. Disponible: https://www.unocha.org/publications/report/world/5-essentials-first-72-hours-disaster-response.

[10] Glado, B. “The Role of Robotics in Disaster Response and Search and Rescue Operations”. Advances in Robotics & Automation. Volume 12, Issue 2.

[11] González-Gutiérrez, L., Caicedo-Eraso, J. C. and Mejía-Gutiérrez, L. F. "Prototype device for monitoring vital signs during transportation of accident patients, preliminary results." Visión electrónica 16.2 (2022).

[12] Luna, J. I., et al. “Monitoreo de signos vitales usando IoT (Monitoring of vital signs using IoT). Pistas Educativas, 2019, vol. 41, no 134.

[13] Murphy, R.R. et al. (2008). Search and Rescue Robotics. In: Siciliano, B., Khatib, O. (eds) Springer Handbook of Robotics. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_51

[14] Pinet, L. M. “Atención prehospitalaria de urgencias en el Distrito Federal: las oportunidades del sistema de salud”. Salud pública de México, vol. 47, no 1, pp. 64-71. Disponible en: https://www.scielosp.org/pdf/spm/v47n1/a10v47n1.pdf

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 24, pp. 350 - 362.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024

Desarrollo e Implementación de una Interfaz Gráfica para el Control del Movimiento de un Sistema de Depósito de Material para los Contactos de una Celda Fotovoltaica

Colorado Jiménez Guillermo, Mino Aguilar Gerardo,
Moreno Coria Luis Armando y Arriaga Arriaga Cesar Augusto.

Maestría en Ingeniería Electrónica, Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y Av. 18 Sur, Edif. FCE6, Ciudad Universitaria, Col. San Manuel, Puebla, Pue., México.
guillermo.coloradojim@alumno.buap.mx

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo e implementación de una interfaz gráfica para el control en tiempo real del movimiento de un sistema de depósito de material para los contactos de una celda fotovoltaica. La interfaz fue diseñada utilizando QT Designer para la creación de los elementos gráficos, mientras que la programación se realizó con PyQt y Python. El sistema fue implementado en una tarjeta Raspberry Pi. Para el control del movimiento de los motores, se utilizó un ESP32. La comunicación entre ambos dispositivos se estableció mediante el protocolo serial RS232, permitiendo el intercambio de información entre la interfaz y el microcontrolador. Los resultados muestran que la interfaz fue capaz de enviar correctamente los datos sobre la cantidad de pasos que debían realizar los motores, verificando que no se produjeran pérdidas o modificaciones en la información durante la transmisión.

Palabras clave: Celda fotovoltaica, interfaz, PyQt, Qt Designer, Raspberry Pi 5, ESP32, comunicación serial.

1. Introducción

La demanda mundial de energía ha aumentado significativamente debido al crecimiento de la población, esto ha llevado al consumo de los recursos naturales como los combustibles fósiles para satisfacer las necesidades actuales de energía eléctrica, una consecuencia de este acto es el cambio climático global. Lo que motiva a buscar nuevas soluciones que no causen mayores problemas al planeta para satisfacer una necesidad básica como lo es la energía eléctrica. Por consiguiente, el uso de energía limpia, renovable y sostenible, como la energía solar es una forma de abordar el problema de abastecimiento energético, ya que es una energía limpia, silenciosa y confiable [1].

En México el consumo de energía per cápita en 2022 fue de 80.62 GJ, 0.23% menor que al año previo. Este aumento derivó de los procesos de optimización más eficientes en las cadenas globales de valor, como parte de la recuperación económica del país tras la emergencia sanitaria por el virus SARS-CoV-2, como lo muestra en la figura 1. Además, la población mexicana creció 0.76% entre 2021 y 2022, al pasar de 128.98 a 129.96 millones de habitantes [2].

México obtiene más del 50 % de su suministro energético total de los combustibles en petróleo crudo y el 15.40 % en energía renovable, como la biomasa con el 4.78 %, la energía eólica y solar 6.36 % y la hidroenergía con 4.22 %. Pero aún no es suficiente el suministro energético de la energía limpias para poder marcar un cambio considerable ya que, según el Balance Nacional de Energía 2021 “se tuvo una participación de las energías limpias de 31.16 %, aumentando 1.69 puntos porcentuales respecto al 2021” [2].

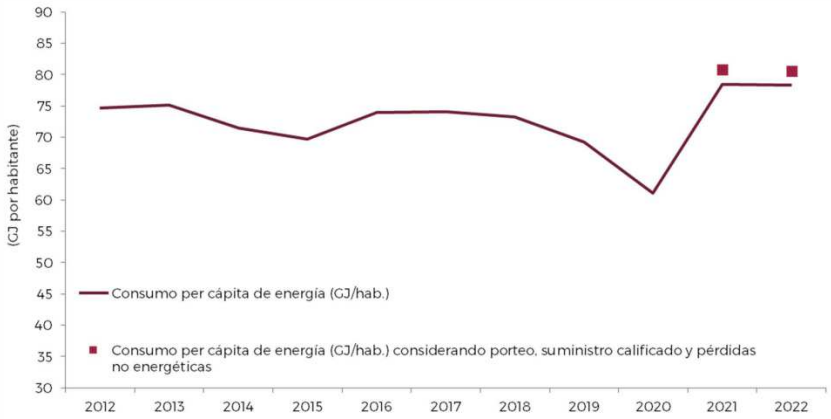


Figura 1. Consumo de energía Per Cápita [2].

El uso de energías renovables es una oportunidad de resolver el problema ambiental, y también poder cubrir con el abastecimiento de energía en el país, hablando específicamente de la energía solar, esta tiene un auge en su tecnología y su desarrollo, debido a que su tecnología fotovoltaica se centra en una unidad esencial, la cual es la celda fotovoltaica, esta se ha impulsado en su desarrollo, debido a sus mínimas consecuencias en el ambiente, siempre y cuando se tenga en cuenta el reciclado de este material al concluir su vida útil, también en el cuidado del proceso de fabricación de este [3], por ello la tecnología fotovoltaica es una gran oportunidad de desarrollo, ya que cuenta con algunos retos por resolver.

Uno de los principales retos en la conversión de energía fotovoltaica a eléctrica es la reflexión de la luz sobre la superficie. Para resolver este asunto se han desarrollado procesos de texturización que modifican la superficie del silicio, disminuyendo los valores de la reflexión superficial por debajo del 10% [4].

La fotolitografía es la técnica que se utiliza para colocar los contactos de la celda fotovoltaica, sin embargo, esta técnica se basa en la reflexión de la luz sobre una superficie. El inconveniente es que hay una superficie texturizada para disminuir la reflexión y esto dificulta la alineación de la mascarilla de los patrones de los contactos, a su vez este proceso requiere un alto número de recursos para poder lograr su objetivo, por lo que se considera un reto por resolver para bajar el costo y la aplicación de los contactos en la celda.

Este artículo propone el desarrollo de una interfaz gráfica que actúe como un sistema humano-máquina, permitiendo al operador realizar actividades relacionadas con el funcionamiento del sistema de depósito de material para los contactos de una celda fotovoltaica. El objetivo principal es asegurar el control eficiente del movimiento del sistema y sus diversos componentes, ya que la interfaz servirá como el medio directo de comunicación y control con el entorno.

El sistema de depósito de material para los contactos de una celda fotovoltaica es un robot cartesiano o también denominado robot pórtico o lineal. El modelo cinemático de este tipo de robot es relativamente sencillo en comparación con otros tipos de robots, dado que presenta características lineales. No obstante, el modelado de este sistema mecánico es crucial para lograr un control adecuado del robot y asegurar su correcto desempeño. Esto permite analizar su comportamiento utilizando distintos algoritmos de control [5].

2. Estado del arte

El primer paso que se dio en el desarrollo de la celda fotovoltaica fue el descubrimiento de efecto fotovoltaico, que se le atribuye al científico francés Edmond Becquerel en el año 1839, él

observó el proceso que ocurre cuando la luz es absorbida por un material y este puede crear un voltaje.

2.1 Trabajos relacionados

En la literatura hablan del avance tecnológico de las celdas fotovoltaicas, desde que aparecieron por primera vez en los satélites como fuente de energía, y estas a su vez han hecho importantes aportes con el paso del tiempo. En la referencia [6] hablan sobre un método diferente de colocar el material conductor sobre los contactos, es un sistema de escritura que implica la deposición de tintas en una película gruesa, mediante la acción capilar de un lápiz de un metal precioso que también sirve como depósito de tinta, en la figura 2 (a) muestra un esquema del sistema.

Después la impresión de jeringa [7] esta no es una tecnología común para el depósito de líneas en la industria fotovoltaica, esta se usa para el depósito de las barras colectoras sobre la superficie de silicio texturizado de forma mecánica.

La impresión por chorro de aerosol metálico [8] es una técnica de escritura directa sin contacto para la metalización frontal de celdas solares de silicio de alta eficiencia. Con esta se crea la una estructura de contacto de dos capas con baja resistencia del contacto y una buena adherencia mecánica a la superficie de silicona, en la figura 2 (b).

La impresión por chorro de tinta [9] es una técnica de impresión adecuada en el caso de sustratos flexibles, se basa en la formación de una pequeña gota de pasta que se deposita sobre el sustrato. Es posible realizar una impresión de dos formas posibles para generar las gotas: mediante el uso de un mecanismo piezoeléctrico que produce una compresión mecánica a través de una boquilla o por calentamiento de la pasta para aumentar el volumen y la presión del chorro de tinta, el ejemplo de sistema se muestra en la figura 2 (c).

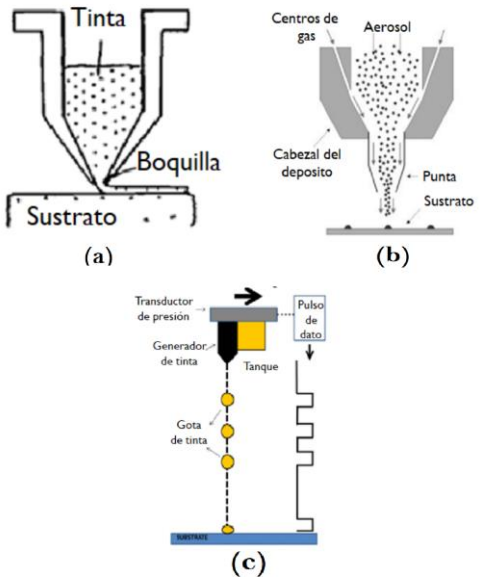


Figura 2. Trabajos relacionados (a) Sistema de escritura, (b) Impresión por aerosol metálico (c) Impresión por chorro de tinta.

3. Selección de materiales

En este proyecto se utilizaron diversos materiales tanto para el hardware como para el software. El propósito de esta sección es describir las características generales de los elementos empleados.

En la figura 3 se presenta un esquema general que ilustra las distintas etapas del proyecto: el control del movimiento de los motores, el procesamiento de imágenes y el control del sistema de inyección. Cada una de estas etapas aborda diferentes procesos, con el objetivo de integrar todos ellos con la interfaz controlando cada parte de estas, así como una herramienta que permite el movimiento del sistema y capturar imágenes de manera simultánea. Cada proceso se lleva a cabo mediante distintas tarjetas de desarrollo, lo que requiere una comunicación continua y eficiente entre los dos microcontroladores, por ello se utilizara una comunicación serial alámbrica.

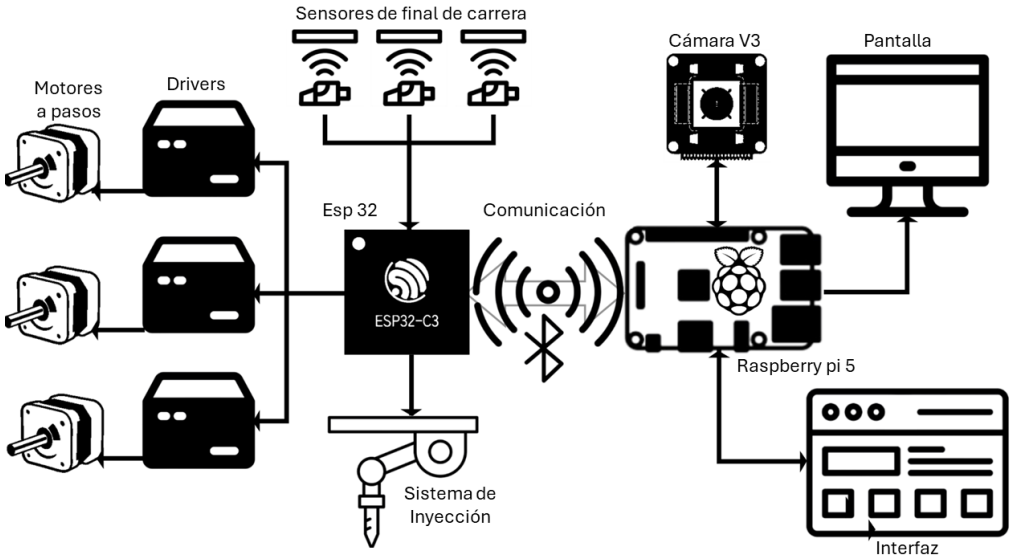


Figura 3. Esquema generar de las diferentes etapas que componen al proyecto.

3.1 Selección de los microcontroladores

El microcontrolador es el núcleo principal para ejecutar las tareas del sistema, por lo que se utilizaron dos microprocesadores para distribuir las funciones necesarias. Se seleccionó la Raspberry Pi 5 como tarjeta de desarrollo debido a que cuenta con un microprocesador embebido, periféricos USB para la transmisión de datos y una conexión CSI para la cámara. Además, incluye 8 GB de memoria RAM y una serie de características adicionales que la convierten en una computadora compacta y versátil. Un ejemplo de esta tarjeta de desarrollo se muestra en la figura 4 (a).

Se eligió la ESP32 DevKit V1, una tarjeta de desarrollo de Espressif Systems, debido a la experiencia previa con este dispositivo y su facilidad de programación en C++. Su función principal será controlar diversos actuadores y adquirir datos de sensores. Además, gestionará el movimiento de los motores a paso y recibirá señales de los sensores de final de carrera para limitar el espacio de trabajo.

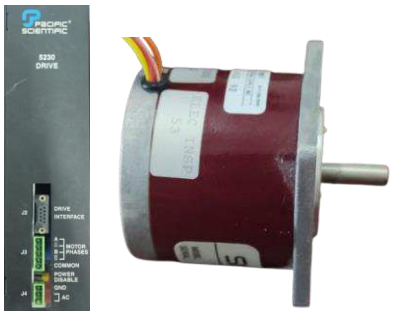
(a) Raspberry Pi 5. (b) Esp32 DevKit V1.

Figura 4. Tarjetas de desarrollo.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 24, pp. 350 - 362.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024

3.2 Actuadores y Diver

Para ejecutar el movimiento del sistema de depósito, es esencial considerar los motores, ya que deben garantizar un desplazamiento preciso por toda la celda fotovoltaica. En este caso, se utilizó un motor a pasos NEMA 23, modelo E21NRFT-LNN-NS-00 de la empresa Pacific Scientific, este se muestra en la figura 5 (b). Además, se empleó el driver 5230, recomendado por el fabricante, que también pertenece a la misma empresa, se muestra en la figura 5 (a). Algunas características técnicas del motor son: una carga máxima de empuje de 7.975 kg, un avance por paso de 1.8°, y un voltaje de alimentación de 35 V DC. Por su parte, el driver presenta un voltaje de salida de 35 V DC, una señal de control de 5-24 V DC, y una frecuencia máxima de 20 KHz.

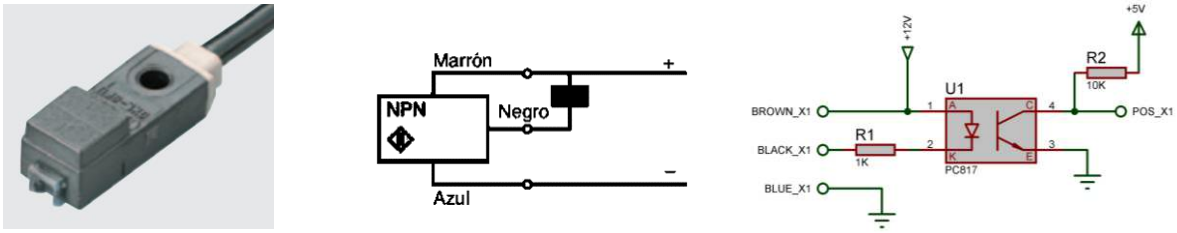


(a) (b)

Figura 5. Actuadores y Diver (a) Driver 5230 (b) Motor a pasos E21NRFT-LNN-NS-00.

3.3 Sensor de final de carrera

En este sistema se utilizará el sensor inductivo GXL-8 tipo NPN, normalmente abierto (NA), el cual se observa en la figura 6 (a), este asegurar que no se exceda el área de trabajo del sistema. En la figura 6 (b), se muestra el esquema del sensor tipo NPN, mientras que en la figura 6 (c) se presenta el circuito empleado para aislar la parte de potencia del sensor y la salida lógica que se conectará a la Esp32 que se encargar del movimiento del sistema, pero a su vez este le informará sobre el estado del sensor a la Raspberry Pi 5.



(a) (b) (c)

Figura 6. Sensor de final de carrera (a) Sensor (b) Esquema (c) Circuito de aislamiento de potencia.

3.4 Cámara

Se utilizó un módulo de cámara V3 de la empresa Raspberry Pi que cuenta con conexión CSI que es compatible con la tarjeta Raspberry Pi 5, cuenta con una cámara de 12 mega pixeles y un sensor IMX708, la cámara tiene un lente que captura la imagen a un ángulo de 102° en modo horizontal y 67° en una posición vertical, la comunicación que tiene este módulo con la tarjeta de desarrollo Rasberry Pi 5 es a través de I2C. La función que realizara la cámara es tomar una foto a la

celda fotovoltaica y con ella hacer un procesamiento de imagen que indique los patrones, donde se colocara el material conductivo, en este caso la interfaz indicara el momento en capturara la imagen.

Figura 7. Cámara Módulo V3.

3.5 Estructura del sistema de depósito de material

Se diseñaron todos los elementos mecánicos del sistema de depósito con el objetivo de visualizar previamente su ensamblaje. Las piezas y el ensamblaje fueron desarrollados utilizando el software SolidWorks, el cual permite dimensionar con precisión las distancias requeridas por el sistema. Además, se diseñó un soporte de PTR de aluminio para el robot cartesiano y una caja de protección de acrílico que aísla al sistema del polvo, el aire y la luz directa. En la figura 8 se muestra el ensamblaje completo del sistema de depósito en el programa de diseño asistido por computadora.

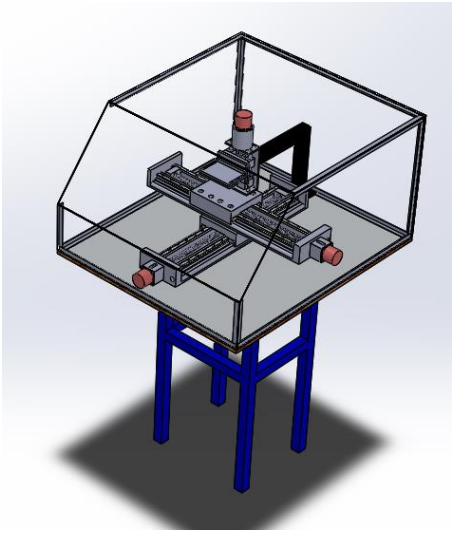


Figura 8. Estructura del sistema de depósito.

4. Desarrollo de la interfaz

4.1 Análisis de los requerimientos del diseño

En el desarrollo de software, el primer aspecto a considerar son los requisitos funcionales. Sin embargo, el diseño y la mejora de la interfaz humano-computadora dependen en gran medida de la interacción con el sistema y de las necesidades específicas de los usuarios. Por lo tanto, al diseñar la interfaz de visualización de control, es crucial tener en cuenta estas necesidades, y el análisis de los requisitos funcionales del sistema de depósito para este diseño podría abarcar lo siguiente:

- Mover el sistema en los ejes X, Y, Z.
- Controlar la dirección del sistema.
- Asignar el número de pasos del motor.
- Ajustar la velocidad de los motores paso a paso.

- Establecer el origen de los ejes.
- Configurar la comunicación entre tarjetas de desarrollo.
- Capturar imágenes.
- Detener el sistema por completo

4.2 Programas para desarrollo de la interfaz

Se eligió el sistema operativo de Raspberry Pi OS para la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 5, y Qt Designer 6.6.0, PyQt5 y Python 3.12 para el desarrollo de la interfaz. Qt es un marco multiplataforma para el desarrollo de aplicaciones GUI (graphical user interface), ofreciendo una amplia gama de funcionalidades para facilitar su creación. Python, por su parte, proporciona una sólida base de código y es conocido por su uso intuitivo. PyQt combina las ventajas de ambos, permitiendo desarrollar aplicaciones GUI de manera eficiente y aprovechando las fortalezas de ellos [10].

La figura 9 muestra las diversas herramientas disponibles en Qt Designer. La barra de herramientas ofrece todas las opciones necesarias para trabajar en el programa. La caja de widgets incluye los elementos que se pueden utilizar en la interfaz, como botones, etiquetas, campos de texto, imágenes, temporizadores, editores de texto, barras de desplazamiento y otros componentes. El editor de propiedades permite ajustar características de los widgets, como tamaño, ubicación, color y estilo. Finalmente, el área de trabajo es donde se colocan los widgets que componen la interfaz.

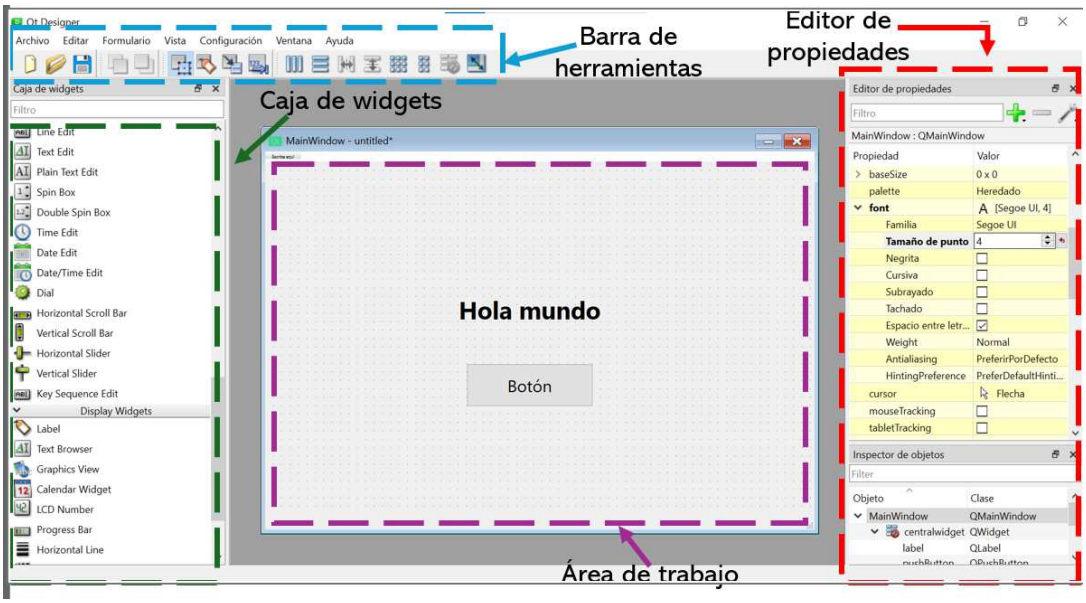


Figura 9. Herramientas de QT Designer.

4.3 Diseño de GUI

En el diseño real de la interfaz, que actúa como un intermediario entre el hardware y el software, se organiza una serie de instrucciones y datos en un formato específico. Esta configuración permite la transferencia y el intercambio de información entre los microcontroladores.

GUI de control del sistema se desarrolla con Qt Designer. La interfaz se organiza principalmente en dos secciones: la interfaz principal y la interfaz de captura de imagen, ambas diseñadas con la clase QWidget. Se utilizan elementos como QLabel, QPushButton, QLineEdit y QCheckBox para el diseño y la construcción de cada sección, permitiendo combinarlos para crear la interfaz personalizada que el usuario requiere. Además del diseño de la interfaz, las funcionalidades del sistema se implementan mediante el mecanismo de señales y ranuras de Qt con la declaración de clases y

objetos en la programación realizada en PyQt5. La codificación sigue el diagrama de flujo mostrado en la figura 9, que ilustra el algoritmo necesario para ejecutar el programa.

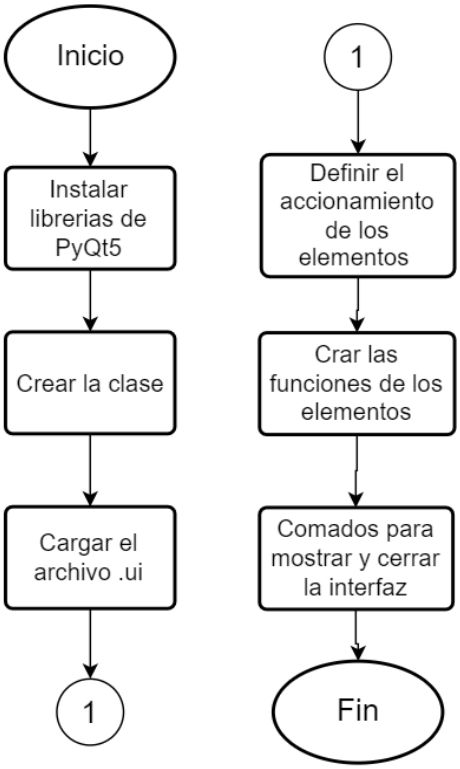


Figura 10. Diagrama de flujo del desarrollo de la interfaz.

El archivo editado por Qt Designer se guardará como un archivo de interfaz de usuario, el cual no incluye código Python. Para convertirlo en un archivo Python, es necesario usar la herramienta PyUIC5 que se incluye la paquetería de herramientas de PyQt5 [10]. La combinación de archivos generados por Qt Designer y archivos escritos en Python es fundamental para el desarrollo en PyQt5.

Si deseamos aprovechar la facilidad que ofrece Qt Designer para crear interfaces mientras implementamos las funciones complejas del software, es necesario modificar el código Python generado después de diseñar la interfaz. Sin embargo, cada vez que realices cambios en Qt Designer, se generarán nuevos archivos de interfaz de usuario y archivos Python, sobrescribiendo los originales. Esto significa que, si editas directamente el archivo Python generado, esos cambios se perderán cuando el archivo se regenere.

Para evitar este problema, especialmente si realizas modificaciones frecuentes en Qt Designer y trabajas constantemente con código Python, es recomendable crear un nuevo archivo [11]. En este archivo, puedes importar el archivo Python generado por Qt Designer, crear una nueva clase, y en su constructor, llamar a la función loadUi, como se muestra en la figura 11.

```
super(MyApp, self).__init__()
loadUi('interfaz_prueba.ui', self)
```

Figura 11. Forma de importa el archivo Python generado por Qt Designer.

De este modo, ya no es necesario declarar cada widget utilizado en la interfaz desde cero. En su lugar, solo se debe de declarar el accionamiento que estimulará su función; por ejemplo, un botón cuando se oprima, este ejecutará una tarea específica determinado por el usuario.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 24, pp. 350 - 362.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024

4.4 Comunicación entre Microcontroladores

La comunicación serial RS232 es un estándar ampliamente utilizado para la transmisión de datos entre dispositivos como computadoras, microcontroladores y otros sistemas electrónicos. Este protocolo facilita el intercambio de información en ambas direcciones mediante una comunicación asíncrona, donde los datos se transmiten de manera secuencial a través de un cable serial. Aunque es un estándar con bastante tiempo, continúa siendo útil en aplicaciones que demandan una conexión sencilla y confiable.

En este contexto, se desarrolló el código necesario para recibir los datos enviados por la interfaz, siguiendo el diagrama de flujo mostrado en la Fig. 9. Este diagrama ilustra la secuencia del código en el microcontrolador de la ESP32, comenzando con la declaración de todas las variables que se utilizarán. A continuación, se definen los puertos de entrada y salida del sistema y, finalmente, se configura la comunicación serial, completando así la primera parte del código. La segunda parte del código consiste en un bucle estructurado con un switch case, que se inicia inmediatamente cuando comienza la comunicación entre la Raspberry Pi 5 y la ESP32. Esta estructura se repite continuamente hasta que los microcontroladores se desconecten o la interfaz se cierre.

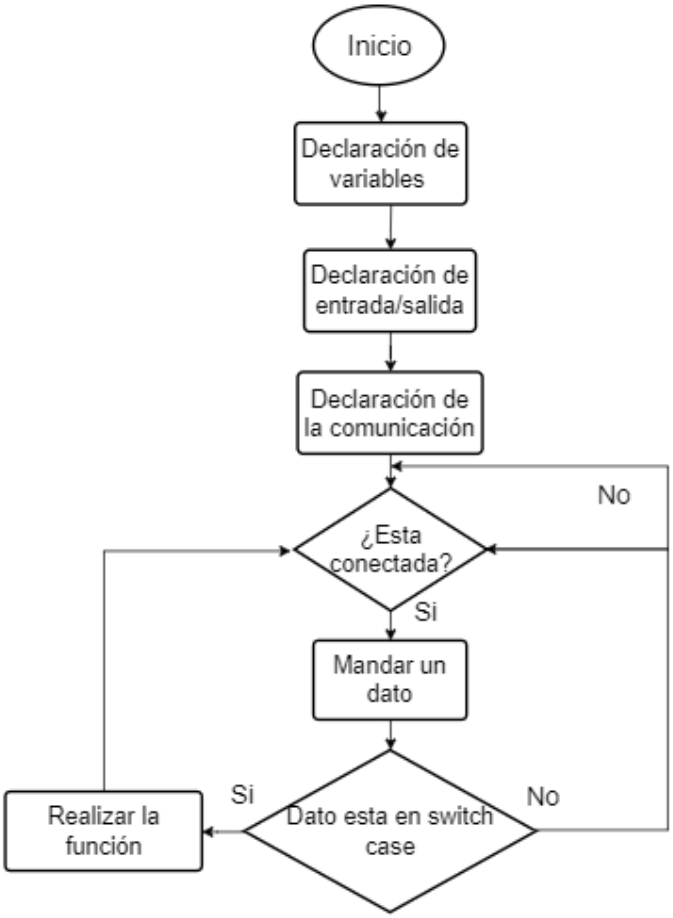


Figura 12. Diagrama de flujo del desarrollo de la comunicación entre microcontroladores.

Cuando la ESP32 recibe un dato, este se evalúa para verificar si coincide con alguna de las opciones definidas en la estructura switch case. Si no hay coincidencia, el microcontrolador no realizará ninguna acción en el sistema de depósito. Sin embargo, si el dato coincide con una de las opciones, se ejecutará la actividad correspondiente.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 24, pp. 350 - 362.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024

5. Implementación de la interfaz

Una vez completada la fase de desarrollo de la interfaz en la Raspberry Pi 5 y el funcionamiento del sistema con la ESP32, se procedió a la implementación. Una pantalla táctil se conectó a la Raspberry Pi, y se estableció la comunicación serial RS232 mediante la conexión de la ESP32 al puerto USB del dispositivo, como se muestra en la figura 13. En esta figura se pueden observar los diferentes componentes utilizados en la implementación. Además, se fabricó una placa PCB para controlar los drivers a través de los puertos DB9 y terminales, los cuales se conectan a los sensores de final de carrara.

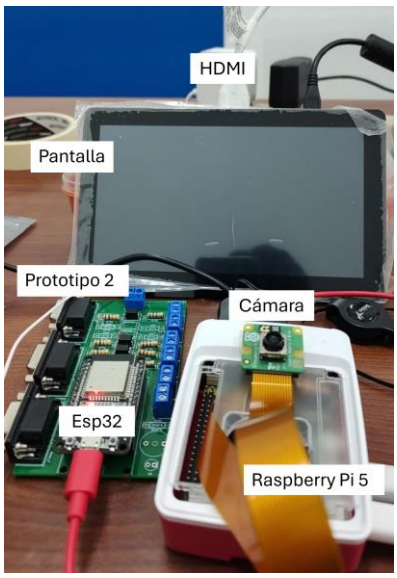


Figura 13 Elementos de la implementación

Al ejecutar el código de Python en la Raspberry Pi 5, se obtiene la interfaz mostrada en la figura 14 (a). En esta interfaz, se pueden seleccionar los puertos de comunicación y la velocidad de transmisión de datos. Además, hay un botón para establecer la conexión entre los dos microcontroladores. Cuando la conexión se realiza correctamente, el botón cambia de "Conectar" a "Desconectar". Un ejemplo de esta transición se ilustra en la figura 14 (b), donde se puede observar claramente cómo el botón refleja el estado actual de la conexión.

(a) **(b)**

Figura 14. Interfaz gráfica con Qt (a) Interfaz de inicio (b) Interfaz cuando se establece la conexión.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 24, pp. 350 - 362.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024

La interfaz también controla la dirección del sistema de depósito a través de una botonera integrada, que permite al usuario ajustar diferentes datos, como el número de pasos y la velocidad de los motores. Este proceso se divide en dos partes: los ejes X e Y se desplazan a la misma distancia, mientras que el eje Z tiene un desplazamiento diferente. Por esta razón, se optó por separar su control para lograr una mayor precisión en el movimiento de los ejes.

La GUI creada incluye una ventana de comentarios, que notifica al usuario sobre el estado del sistema en tiempo real, brindando información sobre los eventos que ocurren en el momento. Esto permite al usuario estar al tanto de lo que sucede en el sistema en cualquier instante, debajo de esta venta, se encuentra un botón “Limpiar”, este tiene la función de borrar todos los comentarios que estén en la ventana, esto con el fin de no saturar el cuadro de texto.

Además, cuenta con una ventana de editor de texto, diseñada para enviar comandos específicos a los microcontroladores. A diferencia de la ventana de comentarios, esta función está orientada a programadores o encargados del sistema que conocen los comandos necesarios para interactuar con el sistema. Una vez que se ingresa la información, se presiona el botón "Enviar" y todo el contenido del editor de texto se transmitirá a las tarjetas de desarrollo.

Otra función que cuenta la interfaz es el botón denominado "Cámara", que al ser presionado abre automáticamente una nueva ventana donde se muestra en tiempo real la imagen captada por la cámara. En esta ventana, hay un botón llamado "Capturar imagen" que permite guardar la visualización actual, como se ilustra en la figura 15 (a). Por otra parte, la ventana nueva de la interfaz cuenta con una pestaña adicional llamada "Info", que proporciona toda la información relacionada con la cámara conectada a la Raspberry Pi 5. El contenido de esta pestaña se puede ver en la figura 15 (b).

(a) **(b)**

Figura 15. Interfaz gráfica al oprimir el botón “Cámara” (a) Ventana de cámara (b) Ventana de información.

6. Resultados

Para validar la comunicación serial entre los dos microprocesadores, se realizaron pruebas de transmisión de información a través de la interfaz correspondiente. Se envió al microprocesador ESP32 el número de pasos y la dirección en la que el sistema debía moverse, con el objetivo de verificar si ejecutaba correctamente la operación solicitada. Para esto, se transmitió una secuencia repetitiva de pasos y se midió la distancia resultante. Las pruebas comenzaron con 1000 pasos, incrementándose en múltiplos de mil hasta alcanzar los 4000 pasos. Luego, el sistema fue revertido siguiendo la misma secuencia para comprobar la precisión del movimiento en sentido contrario. En la figura 16 se muestra la gráfica obtenida a partir de los datos presentados en la tabla 1.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 24, pp. 350 - 362.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024

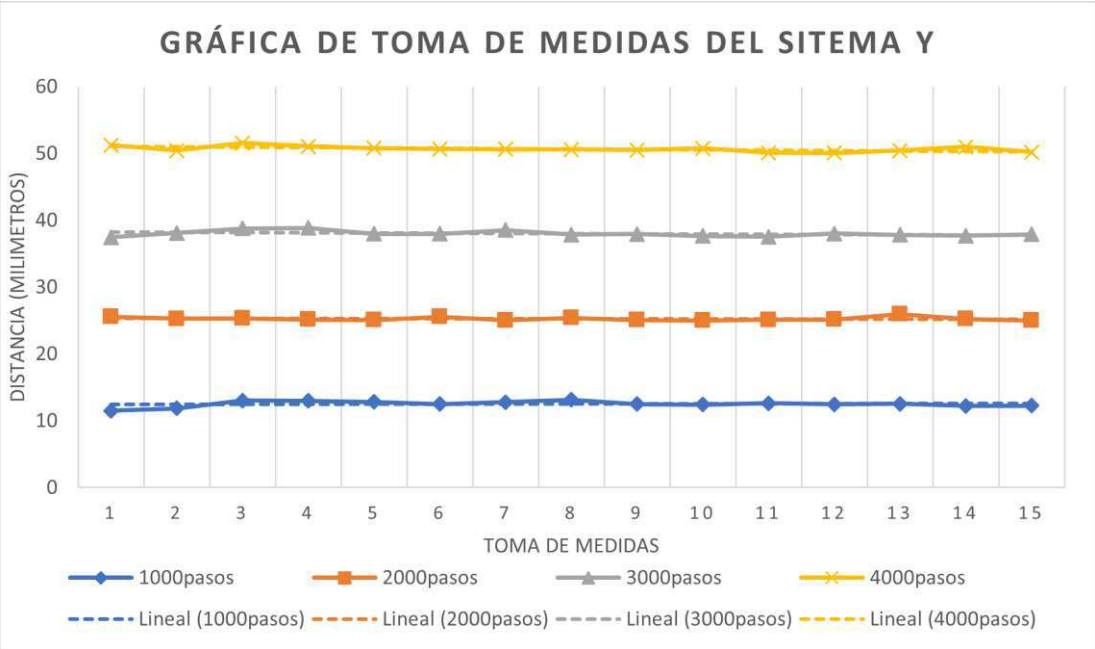


Figura 16. Gráfica de toma de medidas del sistema en el eje Y.

Tabla 1. Tabla de medidas del sistema en el eje Y en milímetros (mm).

Tomas	1000 pasos	2000 pasos	3000 pasos	4000 pasos
1	11.53	25.58	37.46	51.27
2	11.89	25.30	38.11	50.46
3	13.03	25.35	38.81	51.58
4	12.99	25.19	38.89	51.09
5	12.83	25.11	37.99	50.80
6	12.51	25.57	38.00	50.68
7	12.80	25.05	38.56	50.66
8	13.17	25.43	37.87	50.59
9	12.51	25.08	37.95	50.51
10	12.44	25.00	37.66	50.77
11	12.64	25.13	37.54	50.12
12	12.49	25.17	38.04	50.10
13	12.54	25.97	37.85	50.45
14	12.25	25.26	37.69	51.00
15	12.28	25.01	37.92	50.20
Sumatoria	187.9	379.2	570.34	760.28
Media	12.52666	25.28	38.02266	50.68533
Paso	0.01252	0.01264	0.01267	0.01267

7. Conclusiones

El desarrollo de una interfaz es un proceso complejo que abarca múltiples actividades y etapas de prueba con los diferentes componentes del sistema. Todo inicia con una selección cuidadosa de los elementos, basada en los requerimientos del usuario y las necesidades del proyecto. En este caso, se comenzaron las pruebas utilizando el microcontrolador de la tarjeta de desarrollo ESP32. Sin embargo, a medida que avanzaba el desarrollo, surgió la necesidad de mayores recursos para el procesamiento de imágenes, lo que llevó a optar por la Raspberry Pi 5. Este cambio no solo resolvió las limitaciones técnicas, sino que también abrió la posibilidad de diseñar una interfaz gráfica más avanzada y funcional.

A pesar de este avance, el control del movimiento de los motores continuó realizándose a través de la ESP32, dado que el desarrollo en ese aspecto ya estaba avanzado. Para asegurar una integración eficiente, fue necesario establecer una comunicación efectiva entre ambos dispositivos, lo cual se logró mediante la comunicación serial RS232. La interfaz gráfica gestionó este proceso de manera fluida, y su diseño está preparado para futuras expansiones que permitan incorporar tareas adicionales al sistema de depósito.

El éxito de esta interfaz depende de la realización de pruebas exhaustivas que garanticen su funcionamiento óptimo. Es fundamental que sea intuitiva y fácil de usar, incluso para usuarios sin experiencia técnica. Para lograrlo, es indispensable llevar a cabo pruebas de usabilidad y recopilar la retroalimentación de los usuarios finales. Esto permitirá identificar posibles áreas de mejora y asegurar que el sistema sea accesible, eficiente y efectivo en el control del sistema de depósito, adaptándose a las necesidades reales de los usuarios.

Referencias

[1] Junchao, W. y Chang, Z. (2023) *“Defect detection on solar cells using mathematical morphology and fuzzy logic techniques”, Journal of Optics*, pp. 1-11.
[2] SENER, “Balance nacional de energía 2022„” 2022. [En línea]. Disponible: https://base.energia.gob.mx/BNE/BalanceNacionalDeEnerg%C3%ADa2022.pdf
[3] Tawalbeh, M., Al-Othman, A., Kafiah, F., Abdelsalam, E., Almomani, F., y Alkasrawi, M. (2021). “*Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future Outlook”.* Science of The Total Environment, 759.
[4] Murias, M.D.G. (2016). *“Estudio de pasivación de sustratos de C-Si y texturizado por plasma para aplicaciones en celdas solares de heterounión”.*
[5] Reyes, F. “Robótica. Control de robots manipuladores”, Alfaomega Grupo Editor, México, primera edición, 2011.
[6] A. Dziedzic, J. Nijs, y J. Szlufcik, “*Thick-film fine-line fabrication techniques—application to front metallisation of solar cells*,” *Microelectronics International*, vol. 10, no. 1, pp. 18–26, 1993.
[7] G. Schubert, “*Thick film metallisation of crystalline silicon solar cells: Mechanisms, models and applications,*” Ph.D. dissertation, 2006.
[8] A. Mette, P. L. Richter, M. Hörteis, y S. W. Glunz, *“Metal aerosol jet printing for solar cell metallization,” Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 15, no. 7, pp. 621–627, 2007.
[9] P. Mariani, L. Vesce, and A. D. Carlo, *“The role of printing techniques for large-area dye sensitized solar cells,” Semiconductor Science and Technology*, vol. 30, no. 10, 2015.
[10] C. Wang, "Design and Implementation of Interactive PyQt5-Based Air Pollutant Spectral Analysis Software," *2023 IEEE 3rd International Conference on Computer Communication and Artificial Intelligence (CCAI)*, Taiyuan, China, pp. 183-188, 2023.
[11] Tao Wenling and Hou Dongqing, "Application of PyQt5 and Qt Designer in GUI Development", *Journal of Hunan Post and Telecommunication College*, vol. 19, no. 01, pp. 19-21, 2020.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 25, pp. 363 - 379.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Validación del Diseño de un Robot Móvil Agrícola para la Detección de Zonas Dañadas en Cultivos de Frijol

Ruvalcaba Castro Edgar Ricardo, Escareño Fernández Luis Eduardo, Herrera Álvarez Israel, Ibarra Pérez Teodoro, Jaramillo Martínez Ramon y Reveles Martínez Rafael.

Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas (UPIIZ), Zacatecas 98160, México.
eruvalcabac2000@alumno.ipn.mx

Resumen

El proyecto se enfoca en la validación del diseño de un robot agrícola móvil para detectar zonas dañadas en cultivos de frijol. Uno de los principales retos es mantener la estabilidad del robot en los desniveles característicos de los terrenos de cultivo. Para lograrlo, se optó por una configuración cinemática diferencial. Los materiales seleccionados para la estructura son aluminio, acero inoxidable y plástico PLA por su resistencia a la corrosión, ya que el robot estará en contacto con polvo y agua. Se realizaron simulaciones utilizando software de diseño CAD para validar la selección de materiales y sus calibres. Las simulaciones incluyeron un análisis estático para determinar el factor de seguridad, que mide la resistencia de una pieza en comparación con la carga especificada. Se obtuvieron valores mayores a 3.5, lo que indica que el diseño es seguro. Adicionalmente, se realizó un análisis de Von Mises para evaluar la distribución de esfuerzos en el modelo, comparándola con el límite de fluencia del material. Se realizó un estudio de frecuencia para determinar la frecuencia mínima de vibración del modelo y se realizó un análisis de pandeo para determinar el factor de carga. En el análisis de pandeo se obtuvieron valores de factor de carga de 144,11, lo que indica que para que la pieza falle por pandeo se requeriría 144,11 veces la carga aplicada. El diseño incluye sensores y sistemas de navegación avanzados, para identificar y mapear zonas dañadas en los cultivos de manera precisa. Estas características hacen que el robot no solo sea capaz de soportar las condiciones adversas del terreno, sino también de realizar inspecciones detalladas que mejoran la gestión y el mantenimiento de los cultivos.

El desarrollo del robot se centró en la región de la comunidad de El Salto, Fresnillo, Zacatecas. Se baso en una comprensión profunda de las necesidades y características específicas del cultivo de frijol en esta área. Se realizaron múltiples visitas de campo para comprender las prácticas agrícolas locales y adaptar la tecnología implementada en el robot para la detección oportuna de las zonas dañadas en cultivos de frijol.

Palabras clave: Agricultura, locomoción, materiales, robot móvil, software CAD/CAE/CAM.

1. Introducción

La prevención y el diagnóstico oportuno de enfermedades, como lo mencionan B. Roldán-Ortega et al. [1], permiten actuar de manera eficiente sobre dichos padecimientos. En la agricultura, esto no es una excepción, el identificar la causa del daño a las plantas aumenta las posibilidades de éxito en el tratamiento.

A nivel mundial, más del 80% de la producción agrícola es generada por pequeños agricultores de acuerdo con Martin M. V. et al. [2]. Además, la mayor proporción de personas con problemas de pobreza y hambruna viven en esta zona productiva tal cómo lo describe P. A. Sánchez et al. [3]. El campo mexicano se cosecha 4.0 por ciento de la leguminosa que se produce en todo el mundo y durante el año 2021, Zacatecas se posicionó como la entidad líder en la producción de frijol, con el 33.5 por ciento del valor de producción nacional [4].

Hasta un 40% de la producción agrícola mundial se pierde por causa de las plagas, las cuales llegan a afectar a los diferentes cultivos, de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por su acrónimo del inglés) [5]. Las plagas no sólo reducen la producción agrícola, sino que también perjudican la calidad de los cultivos, lo cual supone grandes repercusiones sobre el sector rural.

Existen métodos para determinar las enfermedades de cualquier planta, como llevar muestras de tejido vegetativo a un laboratorio especializado o llevar a un ingeniero agrónomo experto al sitio del cultivo, en cualquiera de los dos métodos, la desventaja radica en el tiempo necesario para obtener los resultados [6].

Este trabajo tiene como finalidad ofrecer una propuesta de solución al problema de la detección oportuna de los daños ocasionados en los cultivos de frijol por plagas, enfermedades o deficiencia de nutrientes, además de mostrar la metodología que se siguió para el diseño del robot, comenzando desde la obtención de las necesidades y métricas del proyecto, hasta lo mas complejo que es el modelado en el software CAD, para realizar las correcciones que se consideran pertinentes, antes de comenzar con la construcción física del mismo.

El concepto de Agricultura Inteligente es la manera en la que el agricultor puede obtener la información más reciente de los productos básicos en los que está interesado. La agricultura inteligente es la aplicación de las nuevas tecnologías de la información, centrada en un enfoque basado en los datos para abordar los desafíos y oportunidades existentes en la agricultura [7].

Los robots móviles están diseñados con patas, ruedas u orugas que les sirven para desplazarse de acuerdo con su programación. Procesan la información que reciben a través de sus propios sistemas de sensores y se emplean en instalaciones industriales. Se utilizan robots de este tipo para la investigación en lugares de difícil acceso o muy distantes, como es el caso de la exploración espacial y las investigaciones o rescates submarinos [8].

Los niveles de autonomía han sido discutidos por distintos autores [9], [10]. En concreto, se ha evaluado la autonomía del robot en relación con la ejecución de las tareas, de manera que algunas de estas se llevan a cabo de manera más eficiente con un mayor grado de autonomía.

La visión artificial o visión por computadora intenta emular la capacidad de los humanos para ver una imagen, entenderla y actuar en consecuencia [10]. El continuo desarrollo de nuevos algoritmos y aplicaciones hacen de esta disciplina una tecnología en constante evolución.

Una red neuronal es un sistema que permite establecer una relación entre entradas y salidas. Se diferencia de la computación tradicional, ya que no utiliza una algoritmia secuencial. Las redes neuronales artificiales se comportan como un cerebro humano, procesando la información en paralelo, con la posibilidad de aprender y generalizar situaciones no incluidas en procesos de entrenamiento [11].

En los siguientes capítulos, abordaremos en detalle el desarrollo del proyecto y las simulaciones sustentan las conclusiones. El capítulo 2 se centra en la metodología del diseño mecatrónico utilizada para el proyecto describiendo lo realizado en cada sección de estas, mientras que el capítulo 3 se presentan los resultados obtenidos y su interpretación.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 25, pp. 363 - 379.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

2. Materiales y métodos

Para el diseño del prototipo se trabajó con base en la metodología del diseño mecatrónico, la cual contempla las siguientes fases:

2.1 Identificación de necesidades

El determinar las principales necesidades del proyecto es una parte crucial ya que con estas se obtiene una planificación efectiva y con ello se compendio de una mejor manera el proyecto, estas se identificaron realizando visitas a campo para comprender a que escenarios se enfrenta el robot, estas cuales se muestran en la Tabla 1, a cada una de las necesidades se asignó la importancia relativa que tienen en el proyecto con un valor numérico en una escala de 1 a 5; asignando 5 a función indeseable, 4 a función no importante, 3 a función buena, más no necesaria, 2 a función altamente deseable y 1 a función de importancia crítica.

Tabla 1. Necesidades y su importancia relativa.

No.	Necesidad	Importancia relativa
1	El robot debe contar con un sistema de locomoción que le permita desplazarse tanto en superficies regulares como irregulares.	1
2	El robot debe tener una correlación entre la velocidad de avance y la captura de imágenes.	1
3	El robot debe tener una comunicación inalámbrica máxima de 120m.	2
4	El robot debe contar con una interfaz humano-máquina que permita el usuario interactuar de manera fácil.	3
5	El robot debe tener un diseño adecuado para dar mantenimiento.	2
6	El robot debe tener un diseño que aislé los componentes eléctricos.	2
7	El robot debe tener una eficiencia energética mínima de 20 minutos de operación.	1
8	El robot debe tener un diseño estéticamente agradable y de calidad.	5
9	El robot debe tener un sistema de adquisición de imágenes mínimo de 20 fps.	2
10	El robot debe tener una suspensión adecuada para reducción las vibraciones.	4
11	Utilizar materiales resistentes a la corrosión.	2

2.2 Identificación de métricas

Las métricas sirven para describir aspectos importantes acerca del diseño del robot móvil, asimismo para identificar y presentar una solución a las necesidades por medio de un lenguaje técnico; la lista de métricas también se utiliza para dar seguimiento a la solución y mejorar la calidad el producto logrando satisfacer las necesidades del cliente. La medición de este permite además cuantificar tanto el proceso como el producto. Las métricas del proyecto se prestan en la Tabla 2 con su respectiva importancia relativa que obtienen en el proyecto.

Tabla 2. Métricas y su importancia relativa.

No.	Métrica	Importancia relativa
1	Masa total del robot	1
2	Inclinación de superficie ni mayor a 15 grados	3
3	Velocidad de desplazamiento y procesamiento de la imagen	2
4	Alcance de la comunicación inalámbrica.	2
5	Estructura estable	4
6	Maniobrabilidad para el mantenimiento	3
7	Dimensiones	1
8	Tiempo de operación	3

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 25, pp. 363 - 379.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

2.3 Especificaciones de diseño objetivo

En la Tabla 3 se muestran las especificaciones de diseño objetivo, observando la relación de cada métrica con ciertas necesidades del proyecto y su importancia relativa. Cada métrica está definida con una unidad de medida específica, ya que deben ser objetivas, medibles y cuantificables. Como último parámetro para verificar al final del proyecto si se cumplieron las métricas, se establece un valor marginal que representa un rango de valores aceptables. Por otro lado, el valor ideal es el objetivo óptimo que se espera alcanzar.

Tabla 3. Especificaciones de diseño objetivo.

No.	No. Necesidad	Métrica	Importancia relativa	Unidad	Valor marginal	Valor ideal
1	1,5,7,8,10,11	Masa total del robot	1	Kilogramos	5-15	8
2	1,10	Inclinación de superficie no mayor a 15 grados	3	Grados	1-15	5
3	2,7,9,11	Velocidad de desplazamiento y procesamiento de la imagen	2	m/s	0.1-0.9	0.6
4	3,4	Alcance de la comunicación inalámbrica.	2	Metros	0-119	120
5	1,10	Estructura estable	4	%	1-100	80
6	5,6,8	Maniobrabilidad para el mantenimiento	3	Horas	0-1	0.5
7	1,5,6,8,10	Dimensiones	1	Metros	0-0.9	0.75
8	2,7,9	Tiempo de operación	3	Minutos	10-60	20

2.4 Diseños conceptuales

En esta etapa se desarrollaron tres modelos con las posibles soluciones al problema planteado a partir de las especificaciones, requisitos y necesidades definidas anteriormente. Un concepto es una descripción aproximada de las características del producto, donde está definida la forma, la tecnología y algunas especificaciones técnicas.

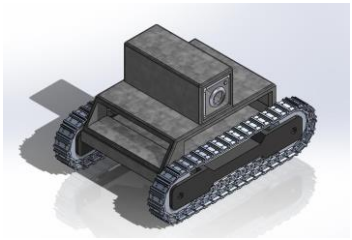


Figura 1. Diseño conceptual 1.

El diseño conceptual 1 ilustrado en la Figura 1, muestra un diseño que cuenta con un mecanismo de desplazamiento de orugas, se considera efectivo para moverse sobre superficies irregulares

característicos de las tierras de cultivo. Para el sistema de visión cuenta con dos cámaras a los costados para obtener un mayor rango de cobertura en una entrada, las dimensiones planteadas para este diseño son de 40 cm de ancho por 50 cm de largo y 30 cm de alto.

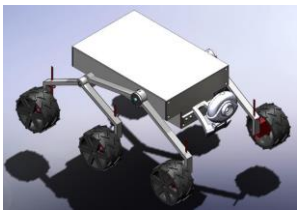


Figura 2. Diseño conceptual 2.

El diseño conceptual 2 se observa en la Figura 2, se plantea que pase por encima de una hilera de frijol, para mantener al robot centrado en el surco cuenta con una cámara tipo ojo de pescado en la parte frontal, a una altura adecuada para tener un mejor ángulo de visión y evitar problemas a la hora de dirigir el robot. Para la obtención de las imágenes se cuenta con una cámara posicionada en la parte inferior del robot, ya que al colocarla en esa posición presenta la ventaja de un mayor ángulo de adquisición de la imagen. Las dimensiones planteadas para este diseño son de 80 cm de ancho por 60 cm de largo y 60 cm de alto.

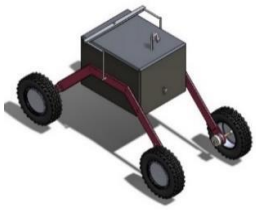


Figura 3. Diseño conceptual 3.

La propuesta de diseño conceptual 3 se muestra en la Figura 3, la cual tiene una configuración cinemática de tipo diferencial sin suspensión. Se propone que este diseño pase por encima de la hilera de plantas de frijol, con ello obtener un mejor campo de visión, además de poner obtener imágenes en un amplio rango de etapas fenológicas en el frijol. Las cámaras contempladas para este diseño son cámaras que contengan herramientas para la percepción de profundidad. Las dimensiones planteadas para este diseño son de 80 cm de ancho por 80 cm de largo y 80 cm de alto.

En la Tabla 4, se obtuvo la masa aproximada del robot ya que con este dato se tomaron decisiones respecto a las fuerzas que actúan sobre el robot. Obteniendo un total de 22.28 kilogramos contemplando los componentes tanto mecánicos, electrónicos y eléctricos que engloba el proyecto.

Tabla 4. Masa aproximada del robot.

Componente	Masa por unidad (kg)	Cantidad	Masa total (kg)
Estructura	15	1	15
Cámaras	0.3	2	0.6
Parte electrónica	1.2	1	1.2
Batería	1.6	1	1.6
Llantas	0.76	4	3.04
Motores	0.21	4	0.84
		Total:	22.28

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 25, pp. 363 - 379.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

2.5 Cálculo del torque requerido en los motores.

En la Figura 4 se muestra el diagrama de cuerpo libre del robot, el cual se utilizó para analizar las fuerzas y momentos que actúan sobre el robot.

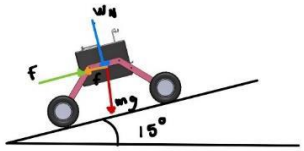


Figura 4. Diagrama de cuerpo libre.

La fuerza normal (w_n) que actúa sobre el robot se calcula con (1), donde se relación con la gravedad (g), la masa (m) a la que estará sometido el robot.

$$w_n = m \cdot g \cdot \cos(15°) \tag{1}$$

A partir de la Tabla 5, en la cual se obtuvo la masa aproximada del prototipo, se consideró un factor de seguridad de 1.122, se tomó el valor de aceleración de la gravedad como $9.81\ {}^{m}/_{s^2}$.

Para el cálculo de la fuerza que se opone al movimiento del robot ($f_{opuesta}$), se realizó un análisis en el diagrama de cuerpo libre para determinar cuáles fuerzas actúan para oponer resistencia al movimiento se observan en (2).

$$f_{opuesta} = m \cdot g \cdot \text{sen}(15°) \tag{2}$$

La fuerza mínima que se requiere para el que prototipo se mueva (f_{min}), es la suma de la fuerza normal que actúa sobre el robot, más la fuerza que se opone al movimiento y además considerando el coeficiente de resistencia a la rodadura (RRC) como se muestra en (3).

$$f_{min} = (RRC)(w_n) + f_{opuesta} \tag{3}$$

En la Tabla 5 se muestra el coeficiente de resistencia a la rodadura por tipos de suelos, para el caso de los suelos de cultivo o tierras labradas se tiene un rango entre 0.1 a 0.2, en este caso se toma el valor más alto para tener un factor de seguridad adecuado.

Tabla 5. Coeficientes de resistencia a la rodadura por tipo de suelo [12].

Naturaleza y Estado del Suelo	Coeficiente de Resistencia a la Rodadura (k)1
Carretera en buen estado	0.02 a 0.04
Camino de tierra afirmado	0.03 a 0.05
Camino de tierra	0.04 a 0.06
Suelo baldío	0.06 a 0.10
Rastrojo seco	0.08 a 0.10
Tierra labrada	0.10 a 0.20
Arena y suelo muy suelto	0.15 a 0.30

La potencia necesaria (P_{total}) para mover al robot se calcula de acuerdo con (4), en la que se involucra la velocidad tangencial de las ruedas (v_t), es decir, la velocidad con la que se desplaza el robot.

$$P_{total} = \frac{f_{min} \cdot d}{t} = f_{min} \cdot v_t \tag{4}$$

Al hacer la relación entre el tiempo que tarda en recorrer un surco de frijol de 120 metros se calculó primero el tiempo que tarda en recorrer un metro, en este se obtuvo que para una velocidad de $0.6\ {}^{m}/_{S}$ se tarda 1.66 segundo en recorrer un metro, para el total de la longitud del surco se obtiene un tiempo de 3.458 minutos, con este dato se determinó que se recorre 5 surcos por carga completa de la batería, los 20 minutos de operación que están en las necesidades del proyecto.

Suponiendo que la carga se distribuye uniformemente en las cuatro llantas, la potencia requerida en cada motor (P_{motor}) estará determinada por la ecuación (5).

$$P_{motor} = \frac{P_{total}}{4} \tag{5}$$

La velocidad angular (ω) se determina mediante (7), donde (r) es el radio de la ruda.

$$\omega = \frac{v_t}{r} \tag{6}$$

El par de torsión (τ_{motor}) de un motor de corriente continua se calcula por medio de la ecuación (7), como parámetros se utiliza la velocidad angular (ω) y la potencia requerida de cada motor.

$$\tau_{motor} = \frac{P_{motor}}{\omega} \tag{7}$$

2.6 Selección de materiales mecánicos

Al seleccionar los materiales para el proyecto se tuvieron en cuenta varias consideraciones:

I. La densidad de los materiales, ya que esto influye directamente en el peso total del prototipo.
II. La dureza del material para determinar la deformación plástica permitida y evaluar su ductilidad para facilitar su manipulación.
III. La temperatura máxima que el material puede soportar sin experimentar deformaciones significativas, ya que estará expuesto a cambios bruscos de temperatura por estar en la intemperie.

2.7 Selección de componentes electrónicos

Para determinar el consumo máximo de los componentes a utilizar se realizó la búsqueda en la literatura para determinar cuál es el consumo energético máximo que tiene cada uno de los componentes del proyecto, es decir, la campara presenta un consumo de 0.32 amperes, cuando se encuentra grabando y operando con todos los componentes que tiene, asi se determinó para cada uno de los componentes con ello se llenó la Tabla 6.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 25, pp. 363 - 379.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Tabla 6. Consumo energético.

Componente	Consumo energético (A)	Cantidad	Total
Cámaras	0.3236	2	0.6472
Tarjeta de desarrollo	2	1	2
Comunicación Lora	0.12	1	0.12
Transmisor de video	0.2	1	0.2
Motor	1.5	4	6
Microcontrolador	0.1	1	0.1
Sensor GPS	0.06	1	0.06
Controlador	1	2	2
		Total	**11.1272**

Una vez obtenido el dato de cuenta corriente consume todos los componentes eléctricos del proyecto, se considera un factor de seguridad de 2, con el que se asegura el correcto funcionamiento del robot. Es necesario conocer la cantidad de corriente que debe suministrar la batería para cumplir con el objetivo de los 20 minutos de operación para ello se utilizó la ecuación (8).

$$Q = I \cdot h \tag{8}$$

Donde Q es la corriente por hora que necesita suministrar la batería, I es la corriente requerida para el funcionamiento del prototipo y h son las horas de funcionamiento.

3. Resultados

Para determinar cuál es el mejor diseño de acuerdo con los criterios de selección propuestos, se determinó la pertenencia adecuada para cada criterio, asimismo se utiliza las ponderaciones relativas para cada uno de los diseños conceptuales propuestos. Al tener las consideraciones anteriores se obtiene la Tabla 7, esta tabla corresponde a la selección de la solución adecuada. Concluyendo que el diseño conceptual más adecuado para el presente proyecto de acuerdo con los criterios de selección y las ponderaciones relativas es el diseño conceptual 3, ya que obtuvo 74.1%, 4.8% más que el diseño conceptual más cercano que fue el diseño conceptual 2.

Tabla 7. Criterios de selección.

Criterios de selección	Pertenencia	DC1	DC2	DC3
A. Dimensiones	0.0909	0.75	0.6	0.85
		0.068	0.055	0.077
B. Masa del prototipo	0.1136	0.75	0.45	0.85
		0.085	0.051	0.097
C. Velocidad de desplazamiento	0.1477	0.6	0.75	0.6
		0.089	0.111	0.089
D. Procesamiento de la imagen	0.1023	0.45	0.75	0.75
		0.046	0.077	0.077
E. Alcance de la comunicación inalámbrica	0.0682	0.6	0.85	0.85
		0.041	0.058	0.058
F. Duración de la batería	0.0795	0.75	0.6	0.75
		0.060	0.048	0.060

G. Controlabilidad	0.0909	0.6	0.75	0.75
		0.055	0.068	0.068
H. Mantenimiento	0.0455	0.45	0.75	0.85
		0.020	0.034	0.039
I. Estabilidad en terrenos irregulares	0.1250	0.45	0.85	0.6
		0.056	0.106	0.075
J. Seguridad	0.0795	0.75	0.75	0.75
		0.060	0.060	0.060
K. Costo de manufactura	0.0568	0.85	0.45	0.75
		0.048	0.026	0.043
TOTALES	1	0.628	0.693	**0.741**

A continuación, se muestra en la Tabla 8, los resultados parciales y totales, para obtener el torque necesaria de los motores para a utilizar en el proyecto.

Tabla 8. Resultados del torque requerido

Fuerza normal (w_n) =	$236.893\ N$
La fuerza que se opone al movimiento del robot ($f_{opuesta}$) =	$63.475\ N$
Fuerza mínima que se requiere para el que prototipo se mueva (f_{min}) =	$110.85\ N$
Potencia total (P_{total}) =	$66.51\ W$
Potencia de cada motor (P_{motor}) =	$16.627\ W$
velocidad angular (ω) =	$56.388\ rpm$
El par de torsión (τ_{motor}) =	$2.815\ N \cdot m$

Con la ecuación (8) se determino cual es la corriente que debe suministrar la batería obteniendo el siguiente resultado.

$$Q = (22.254) \cdot (0.33\overline{3})$$

Por lo tanto

$$Q = 7.418\ Ah$$

Después de conocer la corriente de funcionamiento del prototipo se selección la batería LiPo, la cual suministra 14.8 V y una corriente 12 Ah. Ya que la relación entre ciclos de carga/descarga, precio y pesos la hacen óptima.

En [13] se menciona que para prologar la vida útil de una batería es recomendable utilizar solo el 70% de la capacidad de esta, se obtiene que:

$$Q = 12\ \text{Ah} * 70\% = 8.4\text{Ah}$$

Por lo tanto, la batería tendrá una duración de:

$$Tiempo = \frac{8.4 * 20}{7.498} = 22.647\ minutos$$

La cual cumple con los objetivos del proyecto.

3.1 Selección de materiales y componentes electrónicos.

Para determinar los materiales y los componentes electrónicos, se realizó previamente un análisis con la finalidad de elegir dichos materiales y componentes. Dicho análisis es parte de la metodología de diseño mecatrónico a continuación se muestra una lista de los componentes seleccionados, ya que fue producto de un análisis exhaustivo para la elección de dichos componentes y materiales.

- Perfil cuadrado de acero inoxidable de 25.4 x 25.4 x 1.25 mm. Este perfil fue el utilizado para formar la estructura en la que se acumularán los materiales eléctricos para cubrirlos de polvo y agua.
- Perfil cuadrado de aluminio de 44.45 x 44.45 x 1.25mm. Aleación 6063 (Al - Si - Mg). Este perfil de aluminio fue utilizado para la parte de los brazos del robot, que es la parte donde van colocadas las ruedas y el mecanismo diferencial para la estabilidad del robot.
- Lámina de acero inoxidable calibre 19. Su funcionalidad radico en el encapsulado de los componentes electrónicos.
- Barra solida de acero inoxidable. Para el eje se usó una barra solida de 12.7 mm de diámetro de acero inoxidable.
- Rendijas de ventilación. Debido a las condiciones a las que estará expuesto el robot, así como a la naturaleza de los componentes que estarán dentro de la carcasa, se optó por adquirir rendijas de ventilación. Estas rendijas garantizan un flujo de aire óptimo, al mismo tiempo que se cumple con el objetivo de encapsular y proteger los componentes del polvo y el agua.
- Chumaceras. Estas unidades son encargadas de proporcionar estabilidad al mecanismo diferencial
- Motores eléctricos. En base al cálculo del torque requerido se seleccionaron los motores que cumplieron con los requisitos específicos del proyecto.
- Control de potencia para motores.
- Unidad de procesamiento. Esta unidad será la encargada de aplicar los algoritmos de visión e inteligencia artificial para detectar las zonas dañadas en los cultivos de frijol.
- Cámara de profundidad.
- Transmisor y receptor de imagen.
- Microcontrolador. El microcontrolador en el cual se implementará el sistema de control de los motores es un microcontrolador de 32 bits, las ventajas principales de utilizar este microcontrolador radican en una mayor capacidad de procesamiento a una mayor velocidad, además cuenta con más memoria, lo que permite la implementación de sistemas más complejos.
- Regulador de voltaje. Para suministrar la cantidad adecuada de voltaje a cada uno de los componentes del proyecto.
- Sensor GPS. Generar el mapeo de la zona.
- Módulo de comunicación. Trasmisor y receptor de datos, mediante la tecnología de radiofrecuencia.
- Cable. Para la selección del cable Tabla 7, sobre el consumo energético de los componentes eléctricos del robot, donde se obtiene que la corriente máxima que debe soportar el cable es de 2 A, posterior a ello se realizó un análisis en [14], donde se menciona que en México el estándar que se maneja es el AWS. Se obtiene que el calibre más adecuado para el proyecto es un calibre 12 ya que soporta hasta 4.29 A asi se obtiene un factor de seguridad por encima de la unidad.
- Botón de paro de emergencia.
- Batería. Se selecciono una batería LiPo, que suministra hasta 12000 mA, con un voltaje de 14.8V.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 25, pp. 363 - 379.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

3.2 Simulaciones CAD.

Para corroborar que el diseño soportará las cargas a las que estará sometido se realizaron una serie de simulaciones para determinar si el calibre, el tipo de material y la forma de las piezas son las más optimas, a continuación se presentan una serie de las pruebas realizadas:

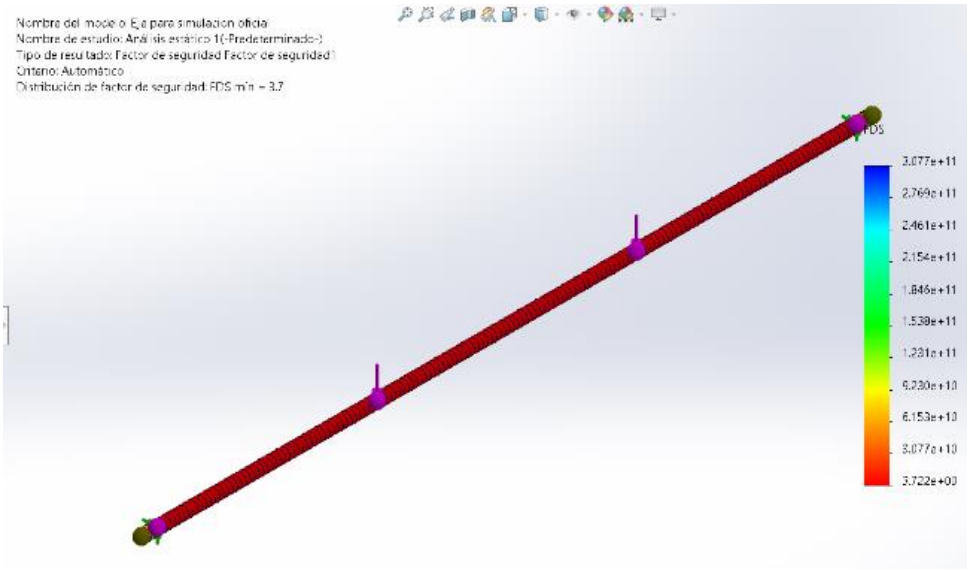


Figura 5. Análisis estático al eje (Factor de seguridad).

El análisis estático mostrado en la Figura 5, en el que se aplican las fuerzas que actúan sobre el eje es el realizado para determinar qué tan fuerte es el diseño con el material especificado (AISI 304) en comparación con la carga especificada, para el caso del eje se obtiene un factor de seguridad de 3.7 lo que indica que el diseño es seguro ya que es mayor a la unidad.

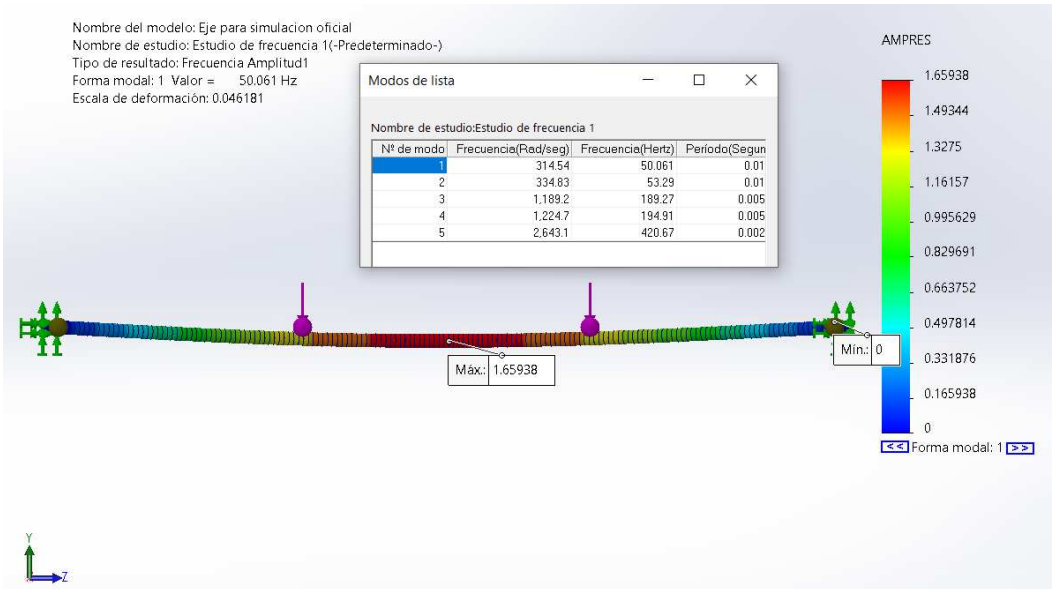


Figura 6. Estudio de frecuencias en el eje.

En la Figura 6, se presenta el estudio de frecuencias donde la frecuencia mínima de vibración es de 50.061 Hz, y la máxima para el quinto modo es de 420.67Hz.

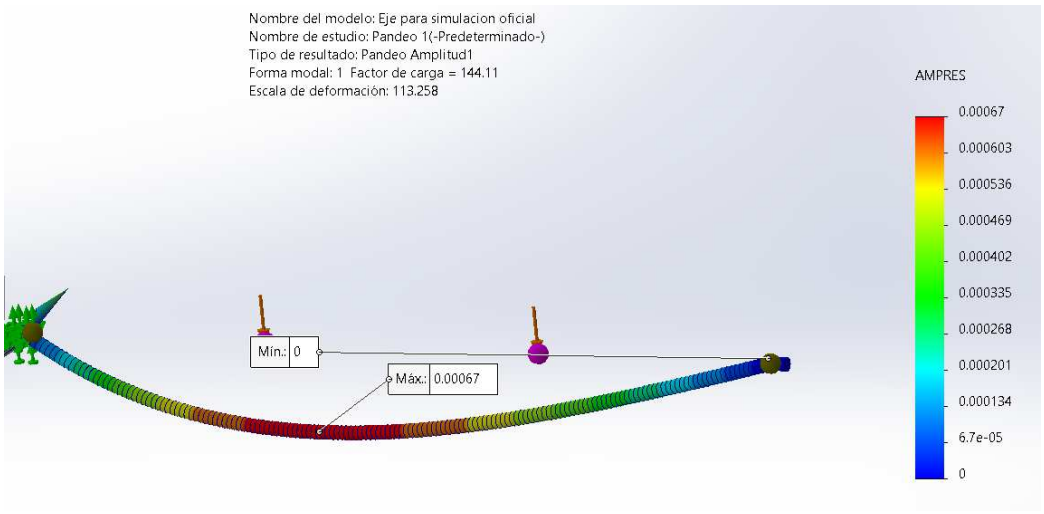


Figura 7. Estudio de pandeo al Eje.

En Figura 7 se muestra el análisis de pandeo realizado al eje, donde se muestra el factor de carga de 144.11 lo cual indica que para que el eje falle por pandeo se necesita aplicar 144.11 veces la carga aplicada para el análisis.

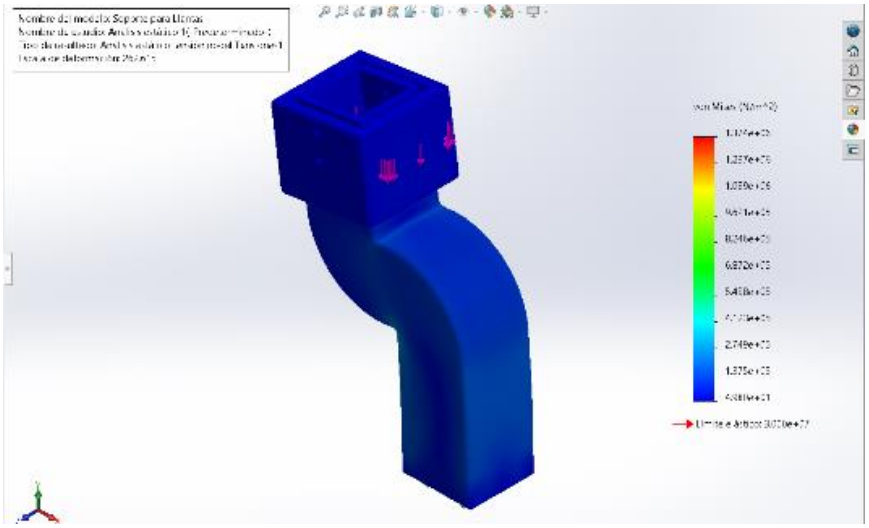


Figura 8. Análisis estático de soporte para llanta (Von Mises).

En la Figura 8 se muestra la simulación realizada al soporte para las llantas en donde se obtiene el resultado del análisis estático de Von Mises que es la distribución de tensiones en el modelo. Las tensiones de Von Mises $(1.374e+06\ N/m^2)$ está por debajo del límite elástico $(3.000e+07\ N/m^2)$. Lo que indica que el modelo es seguro.

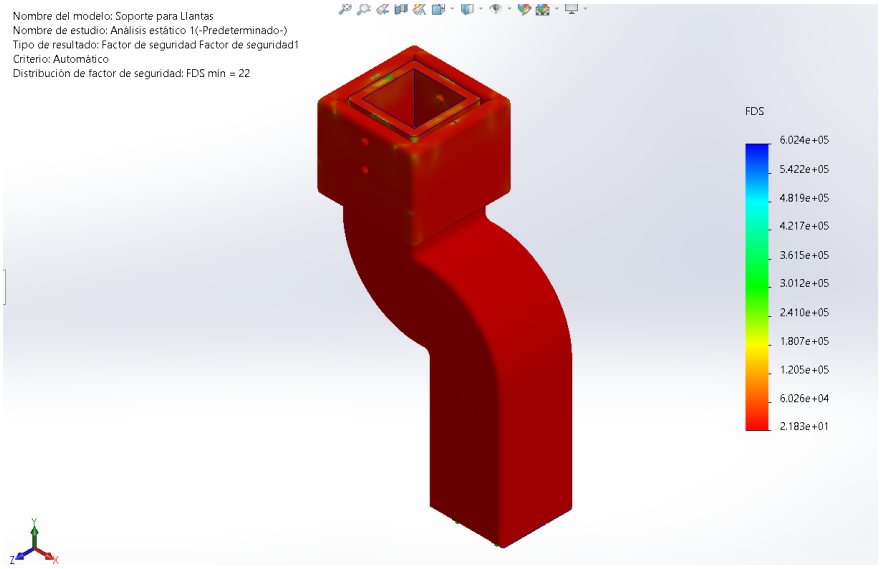


Figura 9. Análisis estático, factor de seguridad de soporte para llantas.

En la Figura 9 se tiene el análisis estático para determinar el Factor de seguridad ya que es una medida de cuanto más fuerte es una pieza en comparación con la carga especificada. El factor de seguridad mínimo es de 22, lo que indica que el diseño es seguro ya que es mayor a la unidad

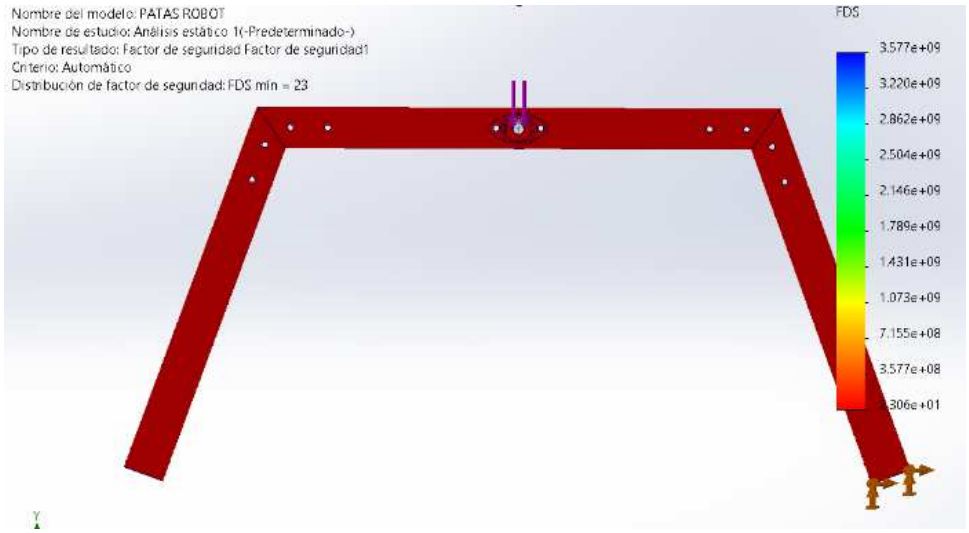


Figura 10. Análisis estático de las patas del robot (Factor de seguridad).

En la Figura 10 se muestra el análisis estático para determinar el factor de seguridad ya que es una medida de cuanto más fuerte es una pieza en comparación con la carga especificada. El factor de seguridad mínimo es de 23, lo que indica que el diseño es seguro ya que es mayor a la unidad.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 25, pp. 363 - 379.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

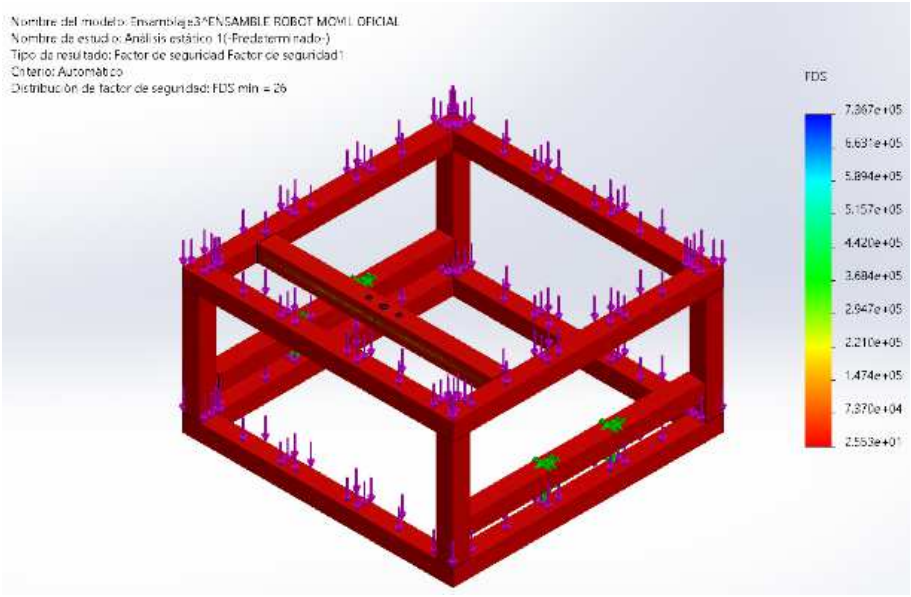


Figura 11. Análisis estático (Factor de seguridad).

La Figura 11 presenta el análisis estático utilizado para determinar el factor de seguridad, que mide cuánto más resistente es una pieza en comparación con la carga especificada. Con un factor de seguridad mínimo de 26, se concluye que el diseño es seguro, ya que este valor es mayor a uno.
Una vez realizadas las simulaciones, se concluyó con el diseño CAD, el cual se muestra en la Figura 11.

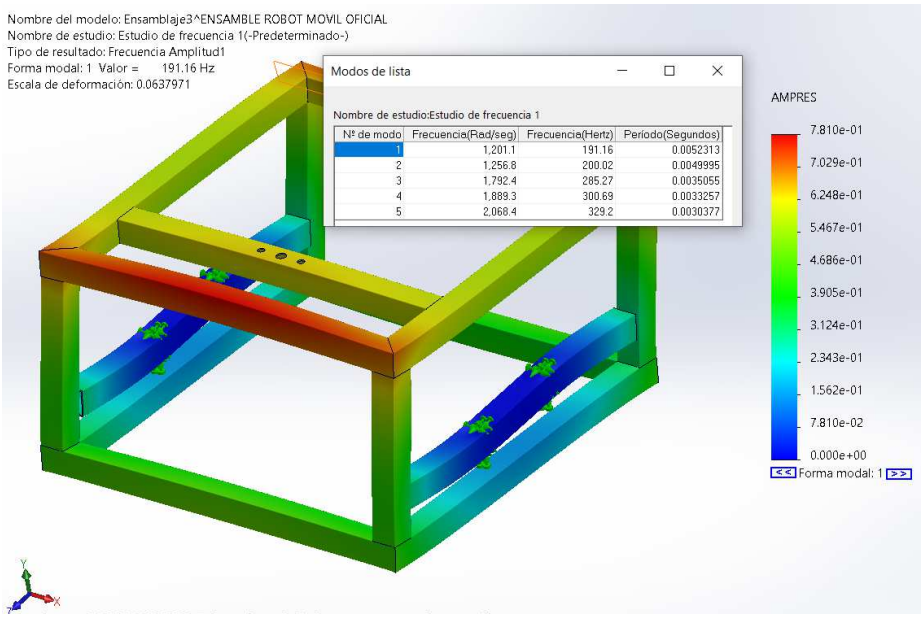


Figura 12. Análisis modal, en la caja.

En la Figura 12, se presenta el estudio de frecuencias donde la frecuencia mínima de vibración es de 191.16 Hz, y la máxima para el quinto modo es de 329.2 Hz.

Figura 13. Vista isométrica del prototipo.

En la Figura 13 se muestra una vista isométrica del prototipo, en la cual se observan los componentes seleccionados que van fuera de la carcasa, por su resistencia al polvo y al agua ya que son componentes diseñados para estar en exteriores, los cuales se encuentran en la posición óptima para su funcionamiento.

Figura 14. Caja para el encapsulado de componentes eléctricos.

En la Figura 14 se observa la caja que fungirá como un encapsulado para los componentes eléctricos, ya que el robot al estar en contacto con superficies que desprenden polvo y agua, los materiales con los que se construirá este encapsulado es acero inoxidable para prevenir la oxidación, además en la figura se muestran los componentes del robot colocados en una distribución estratégica de acuerdo con el diseño eléctrico.

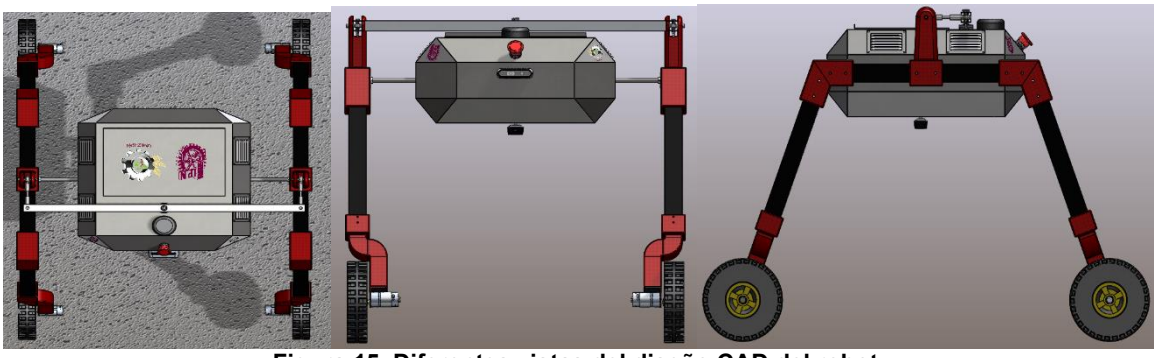


Figura 15. Diferentes vistas del diseño CAD del robot.

En la figura 15 se muestran vistas del robot desde diferentes ángulos, lo que permite detallar la ubicación estratégica de los componentes.

4. Conclusiones

Al analizar los resultados de la Tabla 7, con los principales criterios de selección, se determina que el diseño conceptual ganador es el diseño conceptual tres ya que presenta una mejora en cuanto al alcance de la comunicación inalámbrica, una mejor maniobrabilidad para el mantenimiento. En cuestión de la estabilidad en terrenos irregulares presenta múltiples ventajas ya que el mecanismo diferencial ayuda a mitigar las irregularidades en el terreno y con ello se logra una buena estabilidad en el sistema de visión.

El realizar las simulaciones en la parte mecánica del robot, permite prever condiciones especiales a tomar en cuenta en la implementación final del robot, ya que son múltiples variables las que se deben considerar por la característica de las irregularidades que prestan los terrenos de cultivo. Asi como la optimización de los recursos económicos, humanos y materiales con los que se cuentan. Además un factor que beneficia el realizar las simulaciones es determinar si las geometrías y los materiales propuestos son los adecuados de acuerdo con las fuerzas y los momentos de inercia que actúan sobre ellos, se obtuvieron resultados que cumplen satisfactoriamente con las requerimientos del proyecto, el factor de seguridad en todas las piezas fue mayor a la unidad, el esfuerzo de VonMises al hacer la comparación con el límite elástico de los materiales fue inferior con ello se determina que el modelo es seguro. La configuración cinemática con el mecanismo diferencia fue la más adecuada de acuerdo con las métricas y las necesidades planteadas al inicio del proyecto, además se consideraron materiales como el acero inoxidable, aluminio, plástico PLA, ya que son materiales resistentes a la corrosión por sus propiedades mecánicas.

El diseño del sistema electrónico y eléctrico adecuado para el robot móvil que le permitan su autonomía en zonas aisladas se logró estructurar, y la tabla obtenida del consumo o demanda de energía total de los componentes del robot, permitirá asegurar una autonomía de 20 minutos como mínimo.

Como trabajo futuro se plantea el utilizar un estabilizado para la cámara con el fin de obtener una respuesta más confiable del sistema de visión artificial, utilizar otro tipo de llantas o incluso agregar unas mas robustas para mejorar el agarre en los suelos característicos de las zonas de cultivo.

Referencias

[1] B. Roldán-Ortega, R. Roshan-Biswal, and E. Sánchez-DelaCruz, “Detección de enfermedades en el sector agrícola utilizando Inteligencia Artificial Detection of Diseases in the Agricultural Sector using Artificial Intelligence,” *Research in Computing Science*, vol. 148, no. 7, p. 2019.
[2] A. P. K. Tai, M. V. Martin, and C. L. Heald, “Threat to future global food security from climate change and ozone air pollution,” *Nat Clim Chang*, vol. 4, no. 9, pp. 817–821, Sep. 2014.
[3] P. A. Sanchez and M. S. Swaminathan, “Cutting world hunger in half,” *Science (1979)*, vol. 307, no. 5708, pp. 357–359, Jan. 2005.
[4] Gobierno de México, “Estima Agricultura crecimiento de 11.4% de la producción de frijol en 2021; mantiene tendencia al alza, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.” Oct. 03, 2023.
[5] Gobierno de México, “Agroasemex, S.A.” Oct. 10, 2023.
[6] C. De *et al.*, “Características de la agricultura protegida y su entorno en México,” *Revista Mexicana de Agronegocios*, vol. 29, no. 2011.
[7] A. Rosales Soto y V. R. Arechavala, “Agricultura inteligente como oportunidad de negocio.,” *Universidad de Guadalajara*, vol. 1, no. 1, pp. 4–6, Sep. 2020.
[8] M. R. T. García, J. M. L. HERNANDEZ, and info:eu-repo/dai/mx/cvu/36737, “Robótica móvil,” Jóvenes en la Ciencia: Verano de la Investigación Científica. Vol. 3, Num 2 (2017), Dec. 2017, Accessed: Oct. 02, 2023. [Online]. Available: http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/4898
[9] Olleros Anibal, Robótica: manipuladores y robot móviles, I., vol. I. Barcelona, 2001.
[10] I. García-Santillán, “Vista de la visión artificial y los campos de aplicación.” Accessed: Oct. 09, 2023. [Online]. Available: https://revistasdigitales.upec.edu.ec/index.php/tierrainfinita/article/view/76/2992

[11] Serna Edgar, Desarrollo e innovación en ingeniería, Cuarta., vol. II. Medellín Antioquia, 2019.
[12] A. De et al., “Diseño de robot agrícola para fumigación automática de malezas en terrenos llanos usando visión inteligente FASTER R-CNN en plataforma Python,” 2021, Accessed: May 19, 2024. [Online]. Available: https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/4553.
[12] I. M. I. Jorge, I. G. Torres, and J. Horacio González Ortiz, “Área Transversal de un Cable y su Calibre AWG (American Wire Gauge),” Conciencia Tecnológica No, vol. 46, 2013.
[14] “Determinación de los cambios estructurales morfológicos obtenidos con imágenes de transmisión de rayos X en una batería de ion litio cuando es sometida a ciclos de carga y descarga - hdl:11349/5300.” Accessed: May 21, 2024. [Online]. Available: https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/5300

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 26, pp. 380 - 394.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Diseño de una Interfaz Móvil para un Seguidor Solar

Cervantes Balbino Joan Abed, Domínguez Ramírez Yessica Vannesa, Ramos Arreguín Juan Manuel*, Talavera Velázquez Dimas, Tovar Arriaga Saúl y Pedraza Ortega Jesús Carlos

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería
*jsistdig@yahoo.com.mx

Resumen

El manejo de celdas solares ha cobrado mayor importancia en la actualidad, especialmente la correcta ubicación de las celdas, para aprovechar mejor la radiación solar. Se presenta el diseño de la estructura de un seguidor solar, el cual está formado por 2 grados de libertad, con motores de corriente directa como actuadores, y provisto en su parte superior de un panel solar de 24 voltios. El propósito de este dispositivo es rastrear la trayectoria del sol, utilizando lecturas digitales de los datos suministrados por sensores de luz situados en el panel solar. Se usó un convertidor analógico-digital para medir el voltaje generado por el panel solar, utilizando estos datos para generar una gráfica de voltaje en función del tiempo. La conversión y el procesamiento de los datos, se realiza mediante el microcontrolador PIC18F4550. Se desarrolla una aplicación para dispositivo móvil, para el monitoreo de los datos a través de una gráfica, además de que se puede controlar el movimiento del panel, teniendo como objetivo mover el panel de manera automática o de manera manual. En la interfaz de usuario se incorporarán botones destinados a la activación manual de cada uno de los motores, así como un botón para activar el modo automático, el cual permitirá el seguimiento automático de la trayectoria del sol. Además, se incluye otro botón para desplegar la gráfica del voltaje de la celda en función del tiempo.

Palabras clave: Celda solar, seguidor, aplicación móvil, dispositivos inteligentes, microcontroladores.

1. Introducción

El desarrollo de seguidores solares es una línea de trabajo que ha cobrado gran relevancia en la actualidad, especialmente en la recolección de energía solar. Este tipo de sistemas reubican la posición de la celda solar de manera automática o de forma manual, dependiendo de las necesidades del sistema.

Calderón presenta el diseño y simulación de un seguidor solar, enfocado a mejorar el rendimiento de paneles solares en áreas aisladas [1]. Por otro lado, Romero evalúa tanto la viabilidad económica como la financiera en la producción y en la comercialización de seguidores solares [2].

En cuanto al desarrollo de trabajos de investigación, tenemos que Bhakta presente un sistema híbrido para el seguimiento fotovoltaico, formado por dos ejes [3]. Así mismo, Sathasivam presenta un algoritmo novedoso para celdas solares, basado en el método de optimización de partículas por enjambre, usando colonia de abejas [4]. Wong presenta el diseño e implementación de un seguidor solar dual para un sistema fotovoltaico usando un sistema embebido basado en microcontrolador Arduino [5]. Anshory desarrolla un Sistema de control de seguimiento solar, para el monitoreo de intensidad solar, usando un microcontrolador ESP8266 y sensores de intensidad [6]. Ali aprovecha la tecnología de Internet de las Cosas, basado en el microcontrolador ESP8266 para implementar una técnica de monitoreo inteligente [7]. Así mismo, Rahmat presenta una aplicación de Internet de las Cosas para realizar el monitoreo y almacenamiento de datos de una planta de energía solar, pero no

controla la posición de la celda para aprovechar mejor la energía [8]. Durgadevi también presenta un sistema inteligente de monitoreo basado en Internet de las cosas [9].

En el presente proyecto, el propósito es el desarrollo de una aplicación para el sistema operativo Android, con el fin de controlar el sistema mecánico de un seguidor solar de manera automática y manual. Al usar el modo automático, el sistema busca la posición donde se tenga la mayor radiación solar, por lo que la energía se aprovecha al máximo a lo largo del día.

La aplicación permite el control automatizado y manual del movimiento del seguidor solar, además de visualizar los datos de voltaje generados por el panel solar en forma de gráfico dentro de la aplicación. Este trabajo requiere la integración de diversos conocimientos interdisciplinarios para diseñar la estructura y la programación de la aplicación. Incluye la construcción y montaje del circuito electrónico, la interconexión de los módulos, la programación del microcontrolador, la codificación de la aplicación y la implementación de la comunicación entre el seguidor solar, el microcontrolador y la aplicación.

2. Marco teórico

2.1 Android Studio

Android Studio es el entorno de desarrollo integrado (IDE) oficial para el desarrollo de aplicaciones Android. Es una herramienta potente y versátil que proporciona a los desarrolladores todo lo necesario para construir aplicaciones Android de alta calidad de manera eficiente. Android Studio se basa en IntelliJ IDEA y está desarrollado por Google.

Para comenzar a desarrollar aplicaciones para el Sistema Operativo (SO) de Android, es necesario considerar lo siguiente.

- Configuración del entorno: Antes de comenzar a desarrollar en Android Studio, es necesario configurar el entorno de desarrollo. Esto incluye la instalación del SDK de Android, la configuración del emulador de Android o la conexión de un dispositivo Android físico para realizar pruebas.

- Creación de un nuevo proyecto: En Android Studio, puedes crear un nuevo proyecto seleccionando "File" > "New" > "New Project". Aquí puedes elegir el tipo de aplicación que deseas desarrollar, como una aplicación en blanco, una actividad de navegación, o incluso importar un proyecto existente.

- Diseño de la interfaz de usuario: Android Studio incluye un editor de diseño visual que te permite crear la interfaz de usuario de tu aplicación de forma intuitiva, arrastrando y soltando componentes visuales como botones, campos de texto, imágenes, etc.

- Programación: Android Studio utiliza el lenguaje de programación Java o Kotlin para el desarrollo de aplicaciones Android. Puedes escribir el código fuente de tu aplicación en el editor de código integrado, donde tendrás acceso a todas las funcionalidades de Android SDK para crear la lógica de tu aplicación.

- Compilación y depuración: Una vez que hayas escrito el código de tu aplicación, puedes compilarla y depurarla directamente desde Android Studio. El IDE te proporciona herramientas para depurar tu aplicación y solucionar problemas como errores de código, excepciones y problemas de rendimiento.

La comunicación inalámbrica con el microcontrolador se realiza usando el protocolo Bluetooth, para lo cual deben seguirse los siguientes pasos.

Para implementar la comunicación Bluetooth en una aplicación Android utilizando Android Studio, se deben de implementar los siguientes métodos y variables.

- Agregar permisos Bluetooth: En el archivo de manifiesto de tu proyecto (AndroidManifest.xml), asegúrate de agregar permisos para el uso de Bluetooth, como BLUETOOTH, BLUETOOTH_ADMIN y ACCESS_FINE_LOCATION si es necesario para tu aplicación.

- Configurar el adaptador Bluetooth: En tu actividad principal, obtén una instancia del adaptador Bluetooth utilizando BluetoothAdapter.getDefaultAdapter(). Puedes utilizar este adaptador para realizar operaciones como habilitar o deshabilitar Bluetooth, buscar dispositivos disponibles, etc.

- Conectar dispositivos Bluetooth: Utiliza las clases BluetoothDevice y BluetoothSocket para establecer una conexión Bluetooth con un dispositivo remoto. Puedes obtener una lista de dispositivos emparejados utilizando BluetoothAdapter.getBondedDevices() y establecer una conexión utilizando createRfcommSocketToServiceRecord().

- Transferencia de datos: Una vez establecida la conexión Bluetooth, puedes enviar y recibir datos utilizando flujos de entrada y salida de datos, como InputStream y OutputStream. Puedes enviar datos en forma de bytes y luego interpretarlos según sea necesario en la aplicación.

- Manejo de eventos Bluetooth: Implementa interfaces como BluetoothSocketListener para manejar eventos relacionados con la conexión Bluetooth, como la recepción de datos, errores de conexión, etc.

2.2 Microcontrolador PIC18F4550

El PIC18F4450 es un microcontrolador de la familia PIC18 fabricado por Microchip Technology. Este microcontrolador se caracteriza por su alta capacidad de procesamiento y su amplio conjunto de características, lo que lo hace adecuado para una variedad de aplicaciones en sistemas embebidos y dispositivos electrónicos. Las características de este microcontrolador son las siguientes.

- Arquitectura RISC de 8 bits.
- Frecuencia de operación de hasta 48 MHz.
- Memoria flash de programa de hasta 32 KB.
- Memoria RAM de hasta 2 KB.
- Módulo ADC (Convertidor Analógico-Digital) integrado.
- Interfaces de comunicación UART, SPI y I2C.
- Módulo USB integrado.
- Numerosos periféricos de E/S (Entrada/Salida).

El PIC18F4450 cuenta con un módulo ADC integrado que permite convertir señales analógicas en datos digitales. Para implementar la lectura de una señal analógica utilizando el módulo ADC del PIC18F4450, se debe realizar de la siguiente manera.

- Configuración del módulo ADC: Se deben configurar los registros del módulo ADC para seleccionar la referencia de voltaje, la precisión de la conversión y la frecuencia de muestreo adecuadas para la aplicación específica.

- Inicio de la conversión: Una vez configurado el módulo ADC, se inicia el proceso de conversión utilizando los registros adecuados. El PIC18F4450 puede convertir una señal analógica en datos digitales de manera rápida y eficiente.

- Lectura del resultado de la conversión: Una vez completada la conversión, el resultado se almacena en un registro del microcontrolador. Este valor digital puede ser utilizado por el

programa para realizar diversas operaciones, como controlar actuadores, tomar decisiones o transmitir los datos a otros dispositivos.

Para transmitir y recibir datos a través de un módulo Bluetooth con el PIC18F4450, se realizan los siguientes procesos.

- Configuración del módulo Bluetooth: Se deben configurar los parámetros de comunicación del módulo Bluetooth, como la velocidad de transmisión, el modo de operación y la seguridad.

- Establecimiento de la conexión Bluetooth: El PIC18F4450 debe establecer una conexión Bluetooth con el dispositivo destino utilizando los comandos adecuados. Una vez establecida la conexión, se puede iniciar la transmisión de datos.

- Transmisión de datos: Utilizando los periféricos de comunicación UART o SPI del PIC18F4450, se pueden enviar los datos al módulo Bluetooth para su transmisión. Los datos pueden ser enviados en forma de paquetes con un formato específico para facilitar su interpretación por el dispositivo destino.

- Recepción de datos: El PIC18F4450 puede recibir datos a través del módulo Bluetooth y procesarlos según sea necesario. Los datos recibidos pueden ser almacenados en memoria, utilizados para controlar dispositivos o enviar respuestas al dispositivo remoto.

3. Desarrollo

El proyecto es dividido en las siguientes partes: caja de engranajes, comunicación Bluetooth, armado del circuito, acondicionamiento de la estructura, diseño de la interfaz de usuario, la medición del voltaje del panel y el envío de datos para graficar los valores adquiridos.

3.1 Caja de engranes

Para el diseño de la caja de engranes tuvimos que tomar en cuenta el peso del panel, el torque de nuestros motores y el movimiento que iba a realizar el panel para poder captar el sol, teniendo toda esta información percibimos que se tenía que desplazar en dos planos, por lo tanto, se tenía que implementar dos motores y además, estos motores tenían que tener la fuerza necesaria para poder mover toda la estructura.

Para el movimiento en el plano X, tenemos una caja de engranes, la cual hace que el motor tenga una relación de fuerza mayor, pero con menor velocidad como se ve en la figura 1.

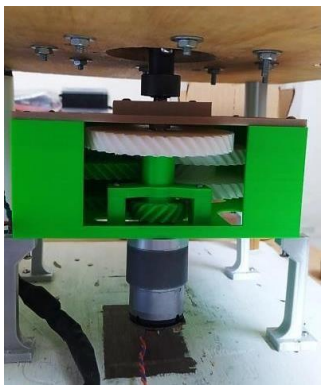


Figura 1. Caja de engranes del eje X.

Para el movimiento en el plano Y, se usa un motor que cuenta con un acoplamiento mecánico en la flecha. Esto nos ayuda para poder conectar un vástago y hacer que únicamente el panel solar se mueva en el plano Y, como se puede mostrar en la figura 2.

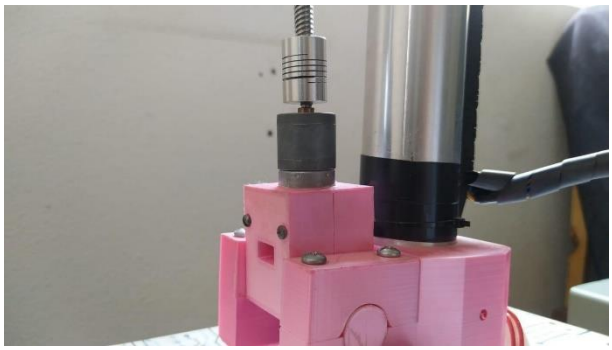


Figura 2. Motor para el movimiento del eje Y.

Uno de los retos a resolver fue limitar el movimiento del seguidor solar a través de los planos X y Y, debido a que las conexiones se podrían desconectar y romper, con el riesgo de daños al sistema mecánico. Por esta razón se limita el movimiento de los motores usando interruptores de límite (Limit Switch), como se puede observar en la figura 3 y en la figura 4. Cuando la estructura activa uno de estos interruptores, el motor ya no se mueve en ese plano y en ese sentido, con la libertad de moverse en la dirección contraria.

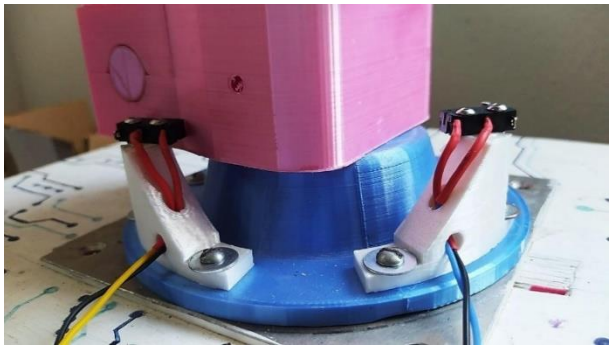


Figura 3. Interruptores de límite para el movimiento en el eje X.

Figura 4. Interruptores de límite para el movimiento en el eje Y.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 26, pp. 380 - 394.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

3.2 Comunicación Bluetooth

Para la comunicación Bluetooth, se usa el módulo HC-05, el cuál es configurado con una terminal serial utilizando los comandos AT, y así poder obtener la dirección del módulo. También se configura la tasa de transferencia de datos y se configura el modo de operación como esclavo. La figura 5 muestra algunos de los comandos usados.

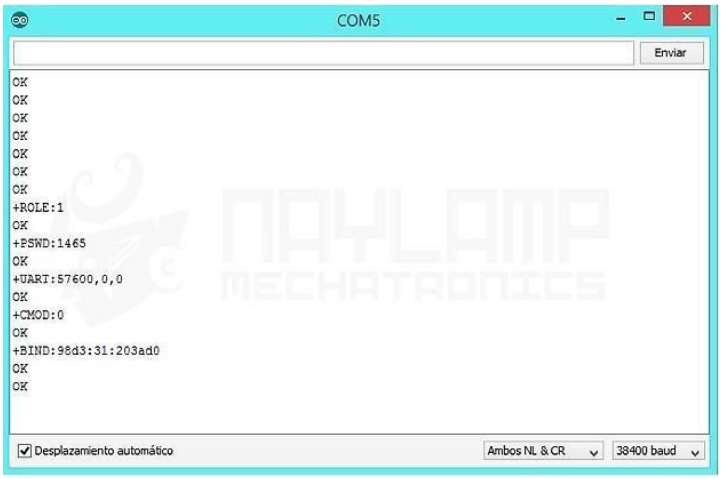


Figura 5. Ejemplo de los comandos AT usados.

3.3 Circuito digital basado en el microcontrolador

Para el armado del circuito, fue necesario realizar numerosas conexiones y organizarlas para facilitar su identificación y correcta ubicación. Un error en las conexiones podría dañar el circuito, por lo que se debe garantizar la seguridad de las conexiones. La figura 6 muestra el armado del circuito digital basado en el microcontrolador PIC18F4550, en una plantilla de prácticas.

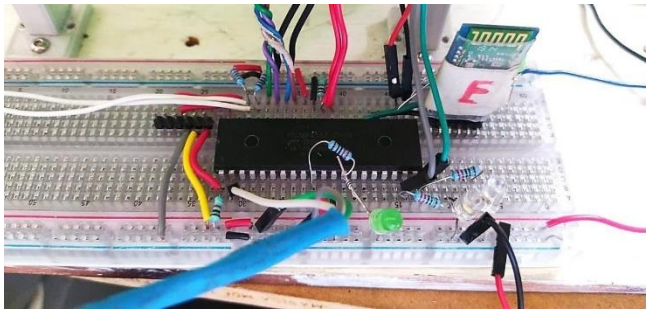


Figura 6. Circuito digital basado en el microcontrolador PIC18F4550.

Todas las conexiones fueron colocadas usando una canaleta flexible y se etiquetó cada cable para una identificación clara y rápida. Este paso fue crucial, ya que el sistema requiere dos fuentes de alimentación distintas: una para la potencia de los motores y otra para el circuito digital.

La figura 7 muestra el cableado organizado con termofit para seguridad de las conexiones, así como del sistema en general. La figura 8 muestra el circuito de potencia, el cual es un módulo basado en el dispositivo L298.

Figura 7. Cableado protegido con termofit y el uso de una canaleta.

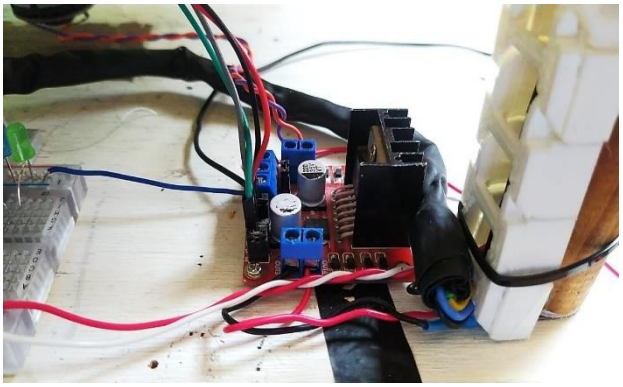


Figura 8. Circuito de potencia, basado en un módulo L298.

La figura 9 muestra el circuito general, usado para controlar el movimiento del seguidor solar, el envío de datos al dispositivo móvil y la comunicación inalámbrica con el mismo dispositivo móvil.

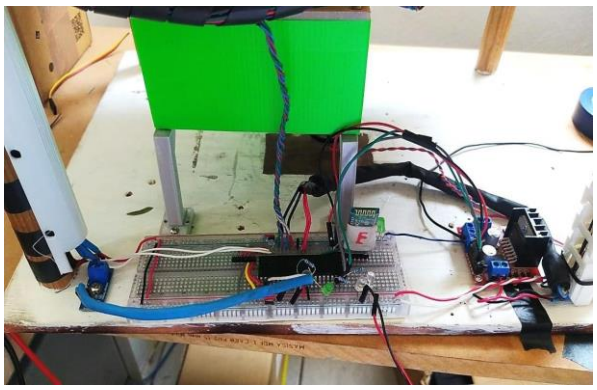


Figura 10. Circuito digital y módulo de potencia integrados para el control del seguidor solar.

3.4 Diseño de la interfaz de usuario

Para el diseño de la interfaz de usuario se diseña una interfaz de usuario teniendo una actividad principal que cuenta con 5 botones, los cuales son “Manual”, “Automático”, “Datos del panel”,

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 26, pp. 380 - 394.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

“Conectarse” y “Desconectarse”. Como se muestra en la figura 11. Si se activa la opción de “Manual”, cambia a la pantalla de la figura 12, la cual cuenta con las opciones para hacer el movimiento del panel y un botón para regresar al menú principal.

Figura 11. Menú principal de la aplicación móvil.

Figura 12. Actividad usada para la opción “Manual”.

Si se usa el botón de “Automático”, cambia a la actividad donde el seguidor solar detecta de manera automática la intensidad de la luz del Sol usando el microcontrolador y los sensores. En la figura 13 se muestra la actividad con tres botones de “Inicio”, “Paro” y “BACK” para regresar al menú principal.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 26, pp. 380 - 394.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

En este punto el sistema se mueve por sí solo para buscar el punto de mayor intensidad solar, moviendo la celda solar en losplanos X y Y.

Figura 13. Actividad de la opción “Automático”.

Al hacer clic en el botón “Datos del panel”, nos llevara a la actividad que se muestra en la figura 14, donde se muestra la gráfica del voltaje en el tiempo.

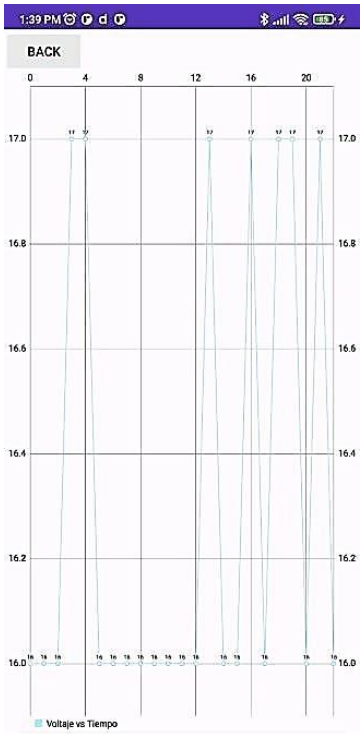


Figura 14. Actividad de “Datos del Panel”.

4. Resultados

4.1 Diseño de la interfaz de usuario

La interfaz de usuario desarrollada para esta aplicación requiere del diseño de 4 actividades, de las cuales se mencionan las características principales. Se hace una descripción de cada actividad, para que si alguien desea trabajar en desarrollar una aplicación similar, pueda tener en cuenta lo que requiere para el diseño.

4.1.1 MainActivity

Se usaron los siguientes objetos.

- TAG: Una etiqueta para la depuración en el logcat.
- DEVICE_ADDRESS: Dirección MAC del dispositivo Bluetooth con el que se va a conectar.
- MY_UUID: UUID estándar utilizado para la comunicación Bluetooth serial.
- bluetoothAdapter: Adaptador Bluetooth del dispositivo.
- bluetoothSocket: Socket Bluetooth para la conexión.
- isConnected: Estado de la conexión Bluetooth

En esta actividad, se usaron los siguientes métodos, de los cuales se describe las características principales.

- **Método onCreate**
    - setContentView(R.layout.activity_main): Establece el diseño de la actividad.
    - findViewById: Obtiene referencias a los botones definidos en el archivo XML de diseño.
    - bluetoothAdapter: Inicializa el adaptador Bluetooth del dispositivo.
    - setOnClickListener: Asigna manejadores de eventos a los botones para realizar las acciones correspondientes:
    - buttonConnect: Conectar al dispositivo Bluetooth.
    - buttonDisconnect: Desconectar del dispositivo Bluetooth.
    - buttonManual: Inicia FirstActivity.
    - buttonAutomatico: Inicia SecondActivity.

- **Método connectBluetooth**
    - Verifica si el adaptador Bluetooth está disponible.
    - Obtiene el dispositivo Bluetooth remoto usando su dirección MAC.
    - Intenta establecer una conexión RFCOMM.
    - En caso de éxito, actualiza el estado de la conexión y muestra un mensaje.
    - En caso de fallo, registra el error, muestra un mensaje y cierra el socket

- **Método disconnectBluetooth**
    - Si está conectado, intenta cerrar el socket Bluetooth.
    - Actualiza el estado de la conexión y muestra un mensaje.

4.1.2 FirstActivity

Las variables usadas son las siguientes.

- ImageView y Button: Referencias a las vistas de la interfaz de usuario.
- Timer: Temporizadores para controlar la rotación de las hélices.
- rotationHelice1 y rotationHelice2: Ángulos de rotación de las hélices.
- isHelice1Running y isHelice2Running: Estados de las hélices (si están rotando o no).
- directionHelice1 y directionHelice2: Direcciones de rotación de las hélices.

- BluetoothSocket y OutputStream: Para manejar la comunicación Bluetooth.
- SEND_DELAY: Intervalo de tiempo para enviar comandos continuamente.
- currentMessage: Mensaje actual que se envía por Bluetooth.
- sendTimer: Temporizador para enviar comandos continuamente.

Los métodos usados se muestran a continuación.

- **Método onCreate**
  - setContentView: Configura el diseño de la actividad.
  - findViewById: Asigna referencias a las vistas.
  - BluetoothConnection: Obtiene el socket Bluetooth.
  - setupButton: Configura los eventos de los botones.
  - buttonBack: Botón para regresar a la actividad anterior.

- **Métodos onResume y onPause**
  - onResume: Inicia el envío continuo de comandos Bluetooth cuando la actividad está visible.
  - onPause: Detiene el envío continuo de comandos Bluetooth cuando la actividad no está visible.

- **Configuración de Botones**
  - setOnTouchListener: Maneja los eventos táctiles de los botones.

- **Envío de Comandos Bluetooth Continuamente**
  - startSendingContinuously: Inicia un temporizador para enviar el mensaje actual continuamente.
  - stopSendingContinuously: Detiene el temporizador.

- **Envío de Comandos y Mensajes Bluetooth**
  - sendBluetoothCommand: Actualiza el mensaje actual a enviar.
  - sendBluetoothMessage: Envía el mensaje actual por el OutputStream.

- **Control de las Hélices**
  - startHelice1 y startHelice2: Inician la rotación de las hélices.
  - stopHelice1 y stopHelice2: Detienen la rotación de las hélices.

- **Método onDestroy**
  - Detiene el envío continuo de comandos cuando la actividad se destruye.

4.1.3 SecondActivity

Los objetos y variables usadas son las siguientes.

- BluetoothSocket y OutputStream: Para manejar la comunicación Bluetooth.
- SEND_DELAY: Intervalo de tiempo para enviar comandos continuamente.
- currentMessage: Mensaje actual que se envía por Bluetooth.
- Timer y TimerTask: Para programar el envío continuo de mensajes.

Los métodos usados en esta Actividad, son los siguientes.

- **Método onCreate**
  - setContentView: Configura el diseño de la actividad.
  - BluetoothConnection: Obtiene el socket Bluetooth.
  - findViewById: Asigna referencias a los botones.

- buttonBack1: Botón para regresar a la actividad anterior.
- Configura los eventos de clic de los botones para enviar comandos Bluetooth.
- Inicia el envío continuo de datos mediante el método startSending.

- **Método startSending**
  - Inicia un temporizador para enviar el mensaje actual continuamente.
  - Métodos sendBluetoothCommand y sendBluetoothMessage
  - sendBluetoothCommand: Actualiza el mensaje actual a enviar.
  - sendBluetoothMessage: Envía el mensaje actual por el OutputStream.

- **Métodos onStop, onPause y onDestroy**
  - Detienen el envío continuo de comandos cuando la actividad se detiene, está en pausa o se destruye.

- **Método stopSending**
  - Detiene el envío continuo de comandos y reinicia el mensaje actual a 'o'.

4.1.4 ThirdActivity

Las variables usadas se muestran a continuación.

- LineChart: Instancia del gráfico de líneas.
- LineData y List<Entry>: Para almacenar y actualizar los datos del gráfico.
- BluetoothSocket y InputStream: Para la comunicación Bluetooth y la recepción de datos.
- HandlerThread y Handler: Para ejecutar tareas en un hilo de fondo y en el hilo principal respectivamente.
- Button: Para el botón de regreso a la actividad anterior.

Los métodos usados y sus características se muestran a continuación.

- **Método onCreate**
  - Configura la vista de la actividad.
  - Inicializa el gráfico de líneas con los datos proporcionados.
  - Verifica la conexión Bluetooth y obtiene el flujo de entrada.
  - Asigna un listener al botón de regreso.
  - Inicia la recepción de datos Bluetooth llamando al método startReceivingData.

- **Método startReceivingData**
  - Inicia un hilo de fondo para recibir datos Bluetooth llamando al método receiveData.

- **Método receiveData**
  - Lee continuamente los datos del flujo de entrada Bluetooth.
  - Procesa los datos recibidos y los envía al hilo principal para su visualización en el gráfico.

- **Método processReceivedData**
  - Convierte los datos recibidos en valores de punto flotante y los agrega a la lista de entradas del gráfico.

- **Método addEntriesToChart**
  - Agrega las nuevas entradas al conjunto de datos del gráfico.
  - Notifica al gráfico que los datos han cambiado y lo invalida para que se vuelva a dibujar.
  - Método onDestroy

- Detiene el hilo de fondo de recepción de datos cuando la actividad se destruye.

4.1.5 BluetoothConection

La variables y métodos usados para el manejo de la conexión Bluetooth son los siguientes.

- **Declaraciones y Variables**
  - instance: Una única instancia de la clase BluetoothConnection.
  - bluetoothSocket: El socket Bluetooth utilizado para la conexión.

- **Constructor Privado**
  - El constructor de la clase es privado para evitar que se creen instancias de la clase directamente desde fuera de la misma.

- **Método getInstance**
  - Es un método estático que proporciona la única instancia de la clase.

4.2 Funcionamiento de la Aplicación solar

En la figura 15 se muestra el seguidor solar, para el que las piezas para armarlo fueron impresas en 3D.

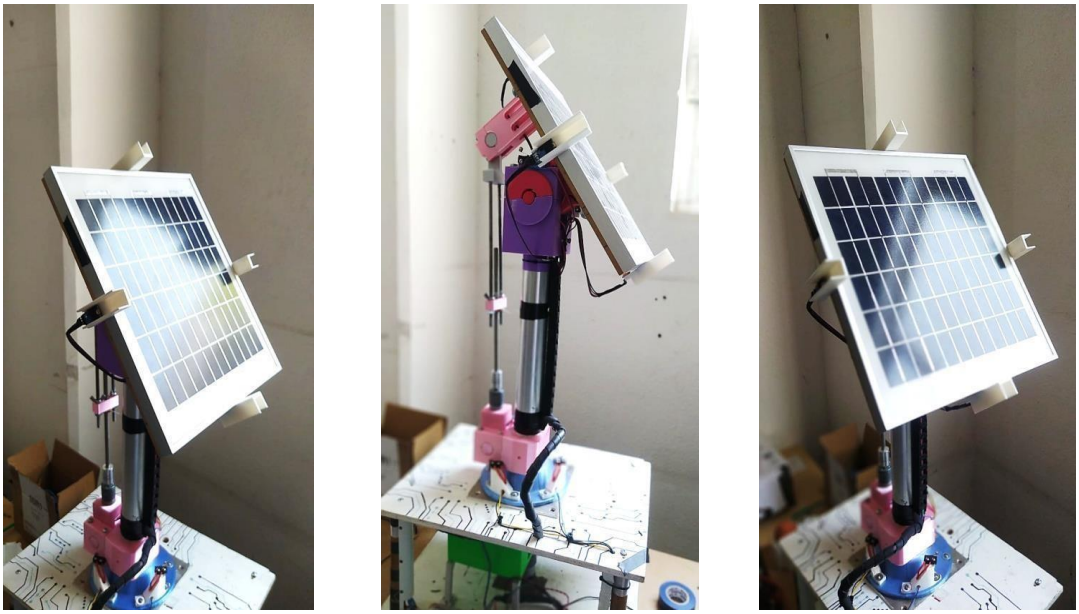


Figura 15. Sistema del seguidor solar.

El microcontrolador se encarga de adquirir los datos del seguidor solar, los cuales son enviados al dispositivo móvil a través del protocolo de comunicación inalámbrico Bluetooth. La aplicación desarrollada puede mostrar gráficas de la información adquirida, la cuál es almacenada en el mismo dispositivo, para su posterior recuperación.

La figura 16 muestra ejemplos de la adquisición de los datos usando la aplicación desarrollada en este trabajo.

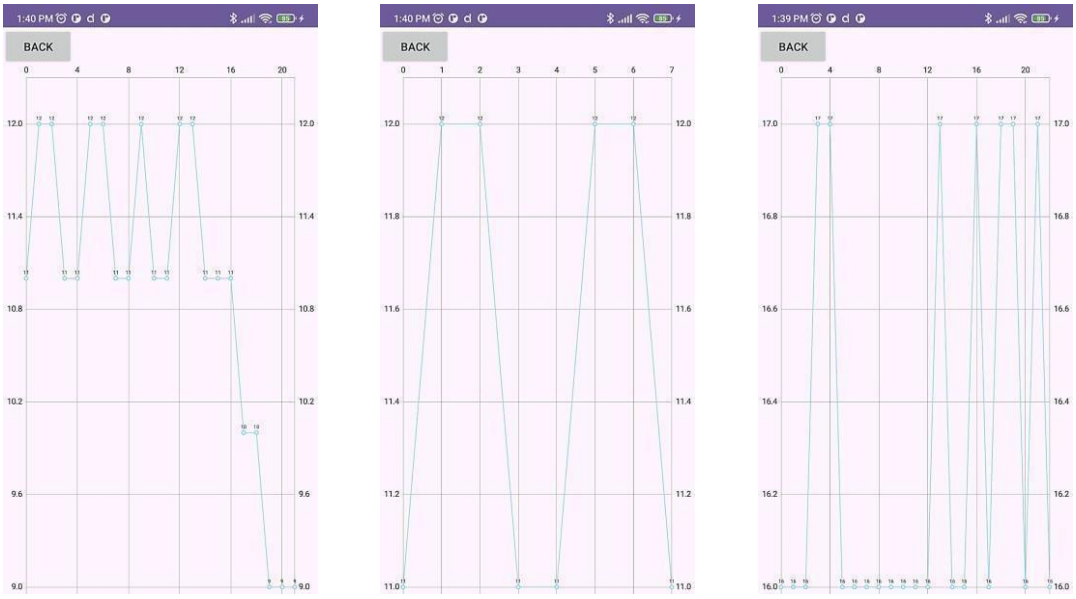


Figura 16. Gráficas de voltaje vs tiempo.

5. Conclusiones

Se ha presentado una solución completa que combina la eficiencia de un seguidor solar con la practicidad de una aplicación móvil. Esta aplicación no solo permite el control automatizado y manual del seguidor solar, sino que también proporciona una interfaz fácil de usar para supervisar y visualizar los datos de voltaje generados por el panel solar.

Así mismo, podemos decir que controlar el panel solar desde una aplicación fue la parte principal para el desarrollo del proyecto, utilizando comunicación vía bluetooth haciendo envío de caracteres para poder controlar los movimientos del panel y también a su vez recibiéndolos para poder mostrar el valor de voltaje en la gráfica. En cuanto a la parte mecánica se optó por acoplar una caja de engranes a un motor de DC, para reducir la velocidad y poder controlar con más precisión la ubicación del panel así como también se optaron por usar interruptores de límite para evitar que tuviera una rotación mayor a lo permitido.

Este trabajo puede ser usado como un medio didáctico para que otros estudiantes vean lo que se puede hacer, y trabajen en mejorar el prototipo presentado, así como la aplicación desarrollada, a la cual le hace falta el manejo de gráficos y de animación de imágenes para tener un mayor impacto visual.

Este trabajo aún tiene cosas importantes por ser desarrolladas, como es el uso de sensores para limitar el movimiento, en lugar de los interruptores de límite; también hace falta usar tecnologías de Internet de las Cosas para que la información se guarde en la nube y pueda ser recuperada posteriormente a distancia.

Referencias

[1] Calderón Naranjo, Cristhian Paúl. "*Diseño y simulación de un seguidor solar para mejorar el rendimiento de paneles solares portátiles*". BS thesis. 2024. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/28740

[2] Romero Sanz, Juan. "*Modelización de la cadena de suministro de un seguidor solar a dos ejes de última generación: viabilidad económico-financiera del modelo de negocio*", Tesis Universidad Politécnica de Madrid, 2024.
[3] Bhakta, Shubhashish, et al. "*Performance Analysis of Hybrid Off-Grid Two-Axis Photovoltaic Tracking System/Fuel Cell Energy System Incorporating High-Efficiency Solar Cell*", The Internet of Energy, Apple Academic Press, págs. 195-206, ISBN 9781003399827, 2024.
[4] Sathasivam, K., Garip, I., Saeed, S. H., Yais, Y., Alanssari, A. I., Hussein, A. A., Lafta, A. M. "*A Novel MPPT Method Based on PSO and ABC Algorithms for Solar Cell*", Electric Power Components and Systems, 52(5), pp. 653–664, 2023, https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2228795.
[5] Wong, Lin Fung; Afrouzi, Hadi Nabipour; Tavalaei, Jalal. Design and implementation of a dual-axis sun tracker for an Arduino-based micro-controller photovoltaic system. *Future Technology*, 2024, vol. 3, no 3, p. 15-19.
[6] Anshory, Izza, et al. "Monitoring solar heat intensity of dual axis solar tracker control system: New approach." *Case Studies in Thermal Engineering* 53 (2024): 103791.
[7] Ali, Ahmed H., et al. "Smart monitoring technique for solar cell systems using internet of things based on NodeMCU ESP8266 microcontroller." *International Journal of Electrical & Computer Engineering (2088-8708)* 14.2 (2024).
[8] Rahmat, Rahmat, Budi Nugroho, and Arif Hidayat Purwono. "IoT Application for Monitoring and Recording Solar Power Plant Data." E3S Web of Conferences. Vol. 500. EDP Sciences, 2024.
[9] Durgadevi, S., et al. "A Smart Solar Monitoring system using IOT." 2024 International *Conference on Communication, Computing and Internet of Things (IC3IoT)*. IEEE, 2024.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 27, pp. 395 - 412.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Puesta en Marcha de Torno CNC con SURFCAM

González Vázquez Luis Gabriel, ✉Mojarro Magaña María*, Venegas Moreno Juan José, Moreno Arango José Antonio y Obando Florián Jair Iván

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán
✉Autora de correspondencia María Mojarro Magaña maria.mm@cdguzman.tecnm.mx

Resumen

Esta investigación presenta la información de las distintas actividades que se realizaron para poner en marcha el torno CNC con control Fagor, la metodología que se implementó es heurística conocida como prueba y error, con la premisa de haber leído los manuales de operación del control Fagor, de la máquina CNC y del software SURFCAM para dibujar y programar. Lo anterior derivó en identificar la metodología para maquinar piezas de forma segura, obteniendo medidas idénticas entre el dibujo y la pieza maquinada.

Palabras clave: Manufactura CNC, Control Fagor, Software SURFCAM.

1. Introducción

Las máquinas de control numérico computarizado surgieron en el Instituto Tecnológico de Massachusetts MTI en la década de 1940, John T. Parsons y Frank L. Stulen, inventarían e implementarían el primer sistema con Control Numérico por Computadora (CNC) en una máquina fresadora para fabricar partes para la industria aeroespacial [1]. Este primer sistema se utilizó para operar fresadoras mediante tarjetas perforadas para programar los movimientos de las máquinas [2].

El CNC se caracteriza por dirigir el posicionamiento en diferentes planos para maquinar una pieza a través de órdenes con un determinado lenguaje de programación [3].

El Torno CNC es una máquina herramienta para mecanizado operada mediante el control numérico (CN) de un ordenador que está incorporado dentro de él, utiliza un sistema de lenguaje que se comunica a través de la emisión de ¨Códigos G'', que es un sistema de comunicación alfanumérico utilizado en este tipo de máquinas sofisticadas [4]. El código G es conocido como el lenguaje de programación más usado para el CN [3].

Las máquinas CNC ofrecen varias ventajas notables, como una mayor flexibilidad en las operaciones, esto incluye la capacidad para fabricar piezas con formas complejas y con gran precisión dimensional. Además, por la disminución de la intervención humana, se mejora la consistencia en la calidad y se acelera la producción, lo que también ayuda a reducir los costos [5].

Una de las dificultades sobre el uso de equipos de máquinas CNC, es que requieren un arduo entrenamiento en las máquinas herramientas convencionales, manejo de programas de cómputo para dibujar y programar en la computadora y finalmente el acceso a los manuales de la máquina CNC que se utilizará [6]. Otras dificultades que frecuentemente se presentan son: 1) Errores de código, 2) Falta de mantenimiento, 3) Vibración o parloteo, 4) Problemas de sujeción del mandril, 5) Fuente de alimentación incompatible, 6) Herramientas o ajustes inadecuados, 7) Sobrecalentamiento [7].

También es crucial destacar que, para mejorar la eficiencia en los tiempos de producción, es necesario contar con personal bien capacitado. [8]. En este sentido, existen varios programas de

diseño asistido por computadora (CAD) y manufactura asistida por computadora (CAM), permiten al usuario, ya sea estudiante o empresa, una fácil y rápida simulación acerca del proceso de fabricación que se va a requerir para realizar alguna pieza o producto [9].

SURFCAM es un sistema CAD/CAM que ofrece una combinación ideal de características y facilidad de uso, es una excelente opción de nivel básico que se destaca por su interfaz intuitiva y sus capacidades para la simulación y el análisis de procesos de fabricación [10].

Este software simplifica la creación de rutas de herramientas y estrategias de mecanizado a partir de modelos en 3D, permitiendo a los usuarios generar instrucciones detalladas para las máquinas CNC [11].

A través de esta publicación se procura divulgar las experiencias obtenidas, al buscar establecer la puesta en marcha del torno CNC, desde el modelado hasta la fabricación de una probeta.

2. Metodología

Esta investigación se desarrolla de acuerdo con las etapas que se muestran a continuación en la Figura 1, para ejemplificar la manufactura de una probeta. Inicia mencionando las partes del torno, los tipos de insertos necesarios, así como una descripción de los sistemas CAD-CAM más utilizados. Continúa con la elección de SURFCAM, el diseño de la pieza y la generación de códigos G y M, terminando con la manufactura de la pieza.

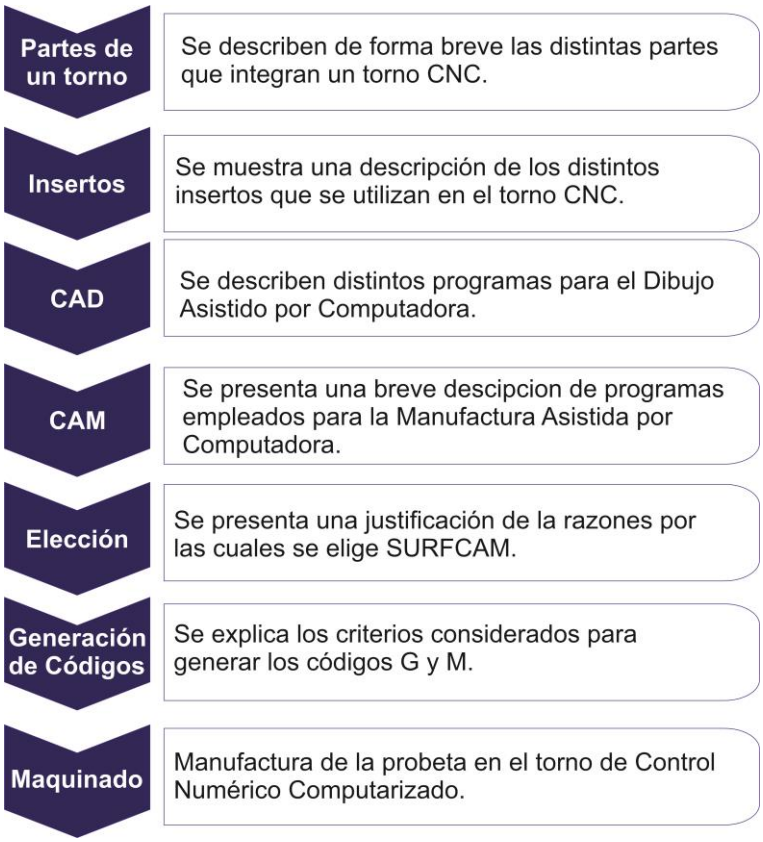


Figura 1. Etapas para manufacturar una probeta CNC

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 27, pp. 395 - 412.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

3. Resultados

3.1 Partes de un torno

Las partes de un torno CNC se muestran en la Figura 2, y se describen a continuación:

- **Husillo o Chuck:** Es un dispositivo mecánico, donde se sujeta los materiales, al ser de tres mordazas, se limita a piezas cilíndricas.
- **Bancada:** Está construida de fundición de hierro o hierro fundido, sirve de soporte a todos los componentes de la máquina herramienta.
- **Carro porta herramientas:** A través de este carro se realizan los desplazamientos de las herramientas de corte que se sujetan en la torre porta herramientas.
- **Torre porta herramientas:** Es donde se colocan los buriles o las barras porta herramientas para torneado interior.
- **Contrapunto:** Es donde se coloca una barra que termine en cono y que ayuda a dar estabilidad a que las piezas cilíndricas que su longitud rebasa tres veces su diámetro.
- **Control:** Es el medio que permite la interacción entre el operador y el torno, utiliza los códigos G y M.
- **Panel de operación:** Es donde se encuentran los botones para encender o apagar el torno CNC, así como las perillas para desplazar el carro porta herramientas.
- **Manguera para soluble:** Es el conducto por medio del cual sale el soluble, que ayuda a disipar el calor que se genera durante el corte, entre las herramientas de corte y el material a maquinar.

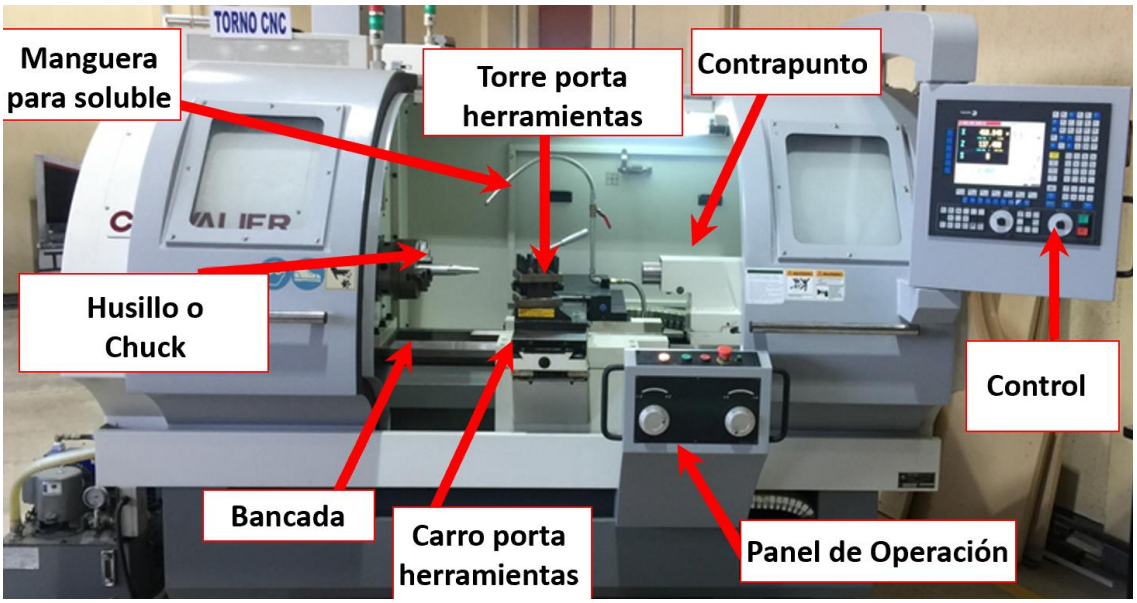


Figura 2. Partes de un torno CNC

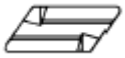
3.2 Insertos

Los insertos de corte o plaquitas intercambiables, son los encargados de retirar el material de un objeto, hasta obtener la pieza con sus dimensiones deseadas, una vez que pierde su filo se cambia o cambia de posición [12]. Además, es importante mencionar que los insertos se clasifican principalmente en dos tipos según su geometría de filo: insertos positivos e insertos negativos. La diferencia entre ellos está en la inclinación del ángulo de corte y en el tipo de operaciones que permiten realizar.

Plaquitas negativas

Las plaquitas negativas se distinguen por su geometría, donde los ángulos del filo apuntan en dirección opuesta a la pieza de trabajo, creando una estructura más robusta. Este diseño las hace ideales para aplicaciones de mecanizado de alta velocidad y eliminación de material pesado. Son más duraderas que las plaquitas positivas, lo que las hace adecuadas para desbaste y el corte de materiales duros o abrasivos. Ofrecen excelente estabilidad en cortes pesados y son comunes en la industria aeroespacial y en el mecanizado de materiales como hierro fundido y acero endurecido [13]. En la Tabla 1, se muestran las plaquitas negativas.

Tabla 1. Plaquitas negativas o insertos

PLAQUITAS NEGATIVAS	
	Para acabado, corte medio, desbaste pesado.
	Para acabado, corte medio, gran desbaste.
	Para acabado, gran desbaste.
	Para acabado, corte medio, desbaste, gran desbaste.
	Para acabado, desbaste ligero.
	Para acabado y corte medio.
	Para copiado.
	Para copiado.

Plaquitas positivas

Las plaquitas positivas se caracterizan por su ángulo de ataque positivo, que favorece un corte más afilado y eficiente, generando una fuerza hacia abajo que mejora el contacto con la pieza. Son ideales para mecanizar materiales blandos, reducir fuerzas de corte, y producir acabados de alta calidad con una alta tasa de eliminación de material. Disponibles en formas cuadradas, triangulares, rómbicas y redondas, su diseño permite múltiples filos de corte, alargando la vida útil y mejorando el rendimiento en diversas operaciones de mecanizado [13]. En la Tabla 2, se muestran las plaquitas positivas.

Tabla 2. Plaquitas positivas o insertos

PLAQUITAS POSITIVAS	
	Para acabado, desbaste.
	Para acabado, corte ligero.
	Para acabado.
	Para acabado.
	Para acabado.
	Para copiado.
	Para copiado.

La principal diferencia entre las plaquitas positivas y negativas radica en su geometría. Las “plaquitas positivas” tienen filos de corte que forman un ángulo hacia la pieza, creando una acción de corte aguda y eficiente con bajas fuerzas de corte. Las “plaquitas negativas”, en cambio, ofrecen mayor durabilidad, con sus filos de corte en ángulo alejado de la pieza, lo que brinda estabilidad en cortes pesados y mejor control de la viruta. Las plaquitas positivas, aunque menos duraderas, son ideales para acabados en materiales blandos y cortes interrumpidos, donde hay vibraciones o golpes. Las plaquitas negativas son más apropiadas para desbaste en materiales duros, gracias a su resistencia[13].

Portaherramientas para torneado exterior

Son dispositivos utilizados para sujetar las herramientas necesarias para realizar torneados en la parte externa de la pieza a trabajar [14]. En la Figura 3, se muestra el portaherramientas para torneado exterior, para plaquitas tanto negativas como positivas.

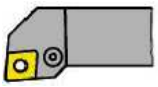


Figura 3. Porta herramienta para torneado exterior

Portaherramientas para torneado interior

Este tipo de portaherramientas se utilizan para incidir o mecanizar la parte interior de la pieza mediante diferentes herramientas. Se emplean para mandrinados, taladrados, ranurados y roscados, entre otros [15]. La Figura 4, muestra el portaherramientas, para torneado interior, tanto para plaquitas positivas como negativas.

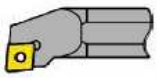


Figura 4. Porta herramienta para torneado interior

3.3 CAD "Dibujo Asistido por Computadora"

El acrónimo CAD como ya se mencionó significa Dibujo Asistido por Computadora. Este término fue introducido en 1959 por Douglas Ross y Dwight Baumann, y se utilizó en 1960 en un anteproyecto del Massachusetts Institute of Technology (MIT) llamado "Computer-Aided Design Project" [16]. La Tabla 3 presenta una descripción de los softwares CAD según su nombre comercial.

Tabla 3. Programas para Dibujo Asistido por Computadora
Fuente de consulta: [17]

Logotipo	Descripción
	SketchUp es un software CAD popular en arquitectura, con versiones Free, Go, Pro y Studio. La versión gratuita tiene funciones limitadas, mientras que Pro y Studio ofrecen herramientas avanzadas y capacidades de exportación. Studio está disponible solo para Windows y es la más costosa.
	Fusion 360, de Autodesk, es un software CAD basado en la nube que integra CAD, CAM, CAE y PCB. Ofrece diseño 3D, simulación, renderizado y colaboración en tiempo real, facilitando el control de versiones y el almacenamiento en la nube.
	SelfCAD es un software CAD intuitivo para modelado y escultura 3D, con herramientas para impresión 3D. Ofrece versiones gratuitas y Pro, con características como modelado de malla, esculpido y cortador STL integrado, adecuado para diseñadores y fabricantes.
	Solid Edge, de Siemens, es un software CAD con tecnología síncrona que combina modelado paramétrico y directo. Ideal para principiantes y profesionales, ofrece alta velocidad, integración de IA y capacidades en la nube para facilitar el diseño y visualización de ensamblajes grandes.
	AutoCAD, de Autodesk, es uno de los primeros software CAD, ideal para dibujo en 2D. Aunque complejo para modelado 3D, permite convertir modelos a archivos STL para impresión. Ofrece una aplicación móvil y web, ampliando su accesibilidad.
	Inventor, de Autodesk, es un software CAD potente para diseño mecánico. Combina diseño paramétrico, directo y basado en reglas, con herramientas para chapas, bastidores y automatización con iLogic. Ofrece opciones de suscripción mensual, anual o trienal.
	CATIA, de Dassault Systèmes, es una suite CAD avanzada para desarrollo de productos en diversas industrias. Facilita el diseño 3D y la colaboración en la nube a través de la plataforma 3D EXPERIENCE, abarcando todas las fases del diseño y construcción.
	Siemens NX combina CAD, CAM y CAE, cubriendo todo el desarrollo del producto desde el diseño hasta la fabricación. Ofrece herramientas integradas para modelado 3D, análisis y simulación, siendo adecuado para empresas y profesionales en la fabricación aditiva. La versión NX mejora la velocidad y la eficiencia a lo largo del desarrollo del producto,
	SOLIDWORKS, de Dassault Systèmes, es un software CAD popular para diseño paramétrico. Incluye herramientas para validación de diseño y fabricación aditiva, utilizando un sistema NURBS para curvaturas detalladas, ideal para piezas complejas en diversas industrias.

3.4 CAM "Manufactura Asistida por Computadora"

El término CAM por su parte se refiere a Manufactura Asistida por Computadora. En 1957, el Dr. Patrick Hanratty creó "PRONTO", el primer software CAM, ganándose el reconocimiento como el pionero del CAD/CAM [16]. En la Tabla 4, se presentan programas CAD/CAM como Mastercam, SURFCAM, y POWERMILL y también módulos como SolidWorks CAM, InventorCAM y Dassault Systémes CATIA.

Tabla 4. Programas CAD/CAM y módulos.

Logotipo	Descripción
Mastercam	Es un software CAD/CAM que permite programar centros de maquinado, torno, fresado-torneado, enrutador, multieje, alambre, diseño y más [18]
surfcam	Es un software CAD/CAM que permite dibujar utilizando distintas entidades geométricas y programar centro de maquinado en 2, 3, 4 y 5 ejes, torno y electroerosionadora [19]
POWERMILL	Es un software avanzado de mecanizado de 5 ejes y alta velocidad para la fabricación compleja de 3 a 5 ejes [20]
	Es un complemento en las versiones de SolidWorks CAM, que le permite preparar diseños para evaluar las posibilidades de fabricación en las primeras fases del ciclo de desarrollo [21]
InventorCAM	Este software trabaja en el entorno de Inventor, simplifica el flujo de trabajo de mecanizado, permitiendo programas fresado, torneado y fresado-torneado de 2.5 a 5 ejes [22]
CATIA	Es un programa de cómputo que ayuda a los programadores de control numérico en la planificación, simulación y optimización de las operaciones de maquinado [23]

3.5 Elección

Después de analizar la diferencia entre los programas CAD, los CAM y los que ofrecen la posibilidad de en una misma interfaz abordar CAD/CAM, se decidió a utilizar SURFCAM por la capacidad que tiene de ofrecer soluciones integradas de CAD/CAM para procesos avanzados de manufactura CNC. Además, SURFCAM, es particularmente útil por su precisión en la generación de trayectorias de herramientas, optimizando la programación de maquinado y reduciendo tiempos de ciclo. También, cuenta con una interfaz intuitiva la cual facilita el proceso de dibujo y programación, lo que lo convierte en una herramienta valiosa tanto para principiantes como para expertos. [19] La elección también se justifica por su capacidad de manejar geometrías complejas y generar código CNC eficiente.

También es importante mencionar que un factor definitivo para trabajar con SURFCAM fue que se recibió una licencia temporal y el soporte técnico por la empresa Soluciones y Diseño en Manufactura, ubicada en Guadalajara, Jalisco.

3.6 Generación de códigos

Las máquinas de Control Numérico Computarizado pueden ser programadas: a pie de máquina, utilizando forma convencional y mediante software, mediante códigos denominados G y M. Se trata de un lenguaje de programación vectorial mediante el que se describen acciones simples y entidades geométricas sencillas (básicamente segmentos de recta y arcos de circunferencia) junto con sus parámetros de maquinado (velocidades de husillo y de avance de herramienta) [24]. En la Tabla 5 se muestran, los principales códigos G para el control Fagor.

Tabla 5. Códigos G
Fuente de consulta: [25]

Función	Significado
G00	Posicionamiento rápido
G01	Interpolación lineal
G02	Interpolación circular derechas
G03	Interpolación circular izquierdas
G04	Temporización/Detención de la preparación de bloques
G05	Arista matada
G06	Centro circunferencia en coordenadas absolutas

Continuación de la Tabla 5. Códigos G
Fuente de consulta: [25]

Función	Significado
G07	Arista viva
G08	Circunferencia tangente a trayectoria anterior
G09	Circunferencia por tres puntos
G10	Anulación de imagen espejo
G11	Imagen espejo en X
G12	Imagen espejo en Y
G13	Imagen espejo en Z
G14	Imagen espejo en las direcciones programadas
G15	Eje C
G16	Selección plano principal por dos direcciones
G17	Plano principal X-Y y longitudinal Z
G18	Plano principal Z-X y longitudinal Y
G19	Plano principal Y-Z y longitudinal X
G20	Definición límites inferiores zonas de trabajo
G21	Definición límites superiores zonas de trabajo
G22	Habilitación/deshabilitación zonas de trabajo
G28	Selecciona el segundo cabezal o conmutación de ejes
G29	Selecciona el cabezal principal o conmutación de ejes
G30	Sincronización de cabezales (desfase)
G32	Avance F como función inversa del tiempo
G33	Roscado electrónico
G34	Roscado de paso variable
G36	Redondeo de aristas
G37	Entrada tangencial
G38	Salida tangencial
G39	Achaflanado
G40	Anulación de compensación radial
G41	Compensación radial herramienta a la izquierda
G41 N	Detección de colisiones
G42	Compensación radial herramienta a la derecha
G42 N	Detección de colisiones
G45	Control tangencial (G45)
G50	Arista matada controlada
G51	Look-Ahead
G52	Movimiento contra tope
G53	Programación respecto al cero máquina
G54	Traslado de origen absoluto 1
G55	Traslado de origen absoluto 2
G56	Traslado de origen absoluto 3
G57	Traslado de origen absoluto 4
G58	Traslado de origen aditivo 1
G59	Traslado de origen aditivo 2
G60	Ciclo fijo de taladrado / roscado en la cara de refrentado
G61	Ciclo fijo de taladrado / roscado en la cara de cilindrado
G62	Ciclo fijo de chavetero en la cara de cilindrado
G63	Ciclo fijo de chavetero en la cara de refrentado
G66	Ciclo fijo de seguimiento de perfil
G68	Ciclo fijo de desbastado en el eje X
G69	Ciclo fijo de desbastado en el eje Z
G70	Programación en pulgadas

Continuación de la Tabla 5. Códigos G
Fuente de consulta: [25]

Función	Significado
G71	Programación en milímetros
G72	Factor de escala general y particulares
G74	Búsqueda de referencia máquina
G75	Movimiento con palpador hasta tocar
G76 G77	Movimiento con palpador hasta dejar de tocar Acoplo electrónico de ejes
G77S	Sincronización de cabezales
G78	Anulación del acoplo electrónico
G78S	Anulación de la sincronización de cabezales
G81	Ciclo fijo de torneado de tramos rectos
G82	Ciclo fijo de refrentado de tramos rectos
G83	Ciclo fijo de taladrado
G84 G85	Ciclo fijo de torneado de tramos curvos Ciclo fijo de refrentado de tramos curvos
G86	Ciclo fijo de roscado longitudinal
G87	Ciclo fijo de roscado frontal
G88	Ciclo fijo de ranurado en el X
G89	Ciclo fijo de ranurado en el eje Z
G90	Programación absoluta
G91	Programación incremental
G92	Preselección de cotas / Limitación velocidad del cabezal
G93	Preselección del origen polar
G94	Avance en milímetros (pulgadas) por minuto
G95	Avance en milímetros (pulgadas)
G96	revolución Velocidad de corte constante
G97	Velocidad de giro del cabezal en RPM
G145	Desactivación temporal del control tangencial
G151	Programación de las cotas del eje X en diámetros.
G152	Programación de las cotas del eje X en radios.

En la Tabla 6, se muestran los códigos Modales M, más comunes para el control Fagor.

Tabla 6. Códigos Modales
Fuente de consulta: [25]

Función	Significado
M00	Parada de programa
M01	Parada condicional del programa
M02	Final de programa
M30	Final de programa con vuelta al comienzo
M03	Arranque del cabezal a derechas (sentido horario)
M04	Arranque del cabezal a izquierdas (sentido anti-horario)
M05	Parada del cabezal
M06	Código de cambio de herramienta

3.7 Maquinado de probeta

En la Figura 5, se muestran las vistas con sus respectivas dimensiones de la probeta a maquinar. El proceso de maquinado se describe en las siguientes 5 fases:

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 27, pp. 395 - 412.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

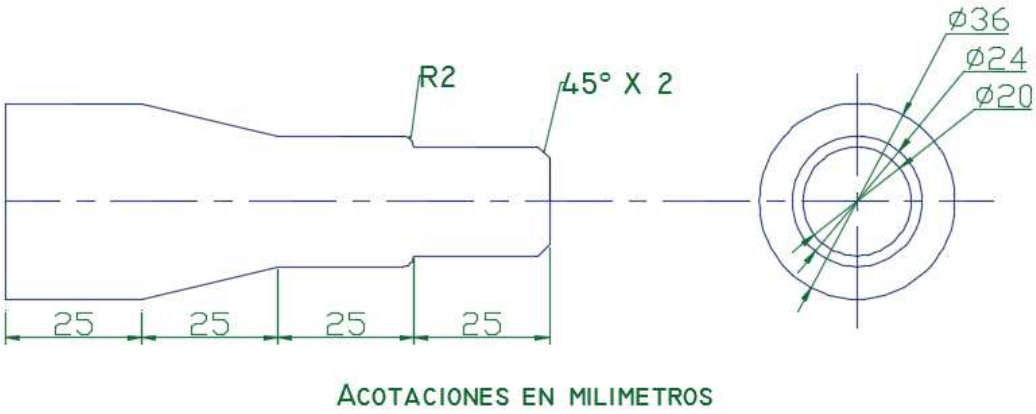


Figura 5. Vistas de una probeta

Fase 1. Selección de torno con unidades en milímetros

SURFCAM, brinda la posibilidad de poder programar un torno CNC trabajando en función al radio o diámetro. Para seleccionar la opción Radio del torno, se hace de la siguiente forma: se despliega el menú Herramientas/ Axis/ Radio del torno, como se muestra en la Figura 6.

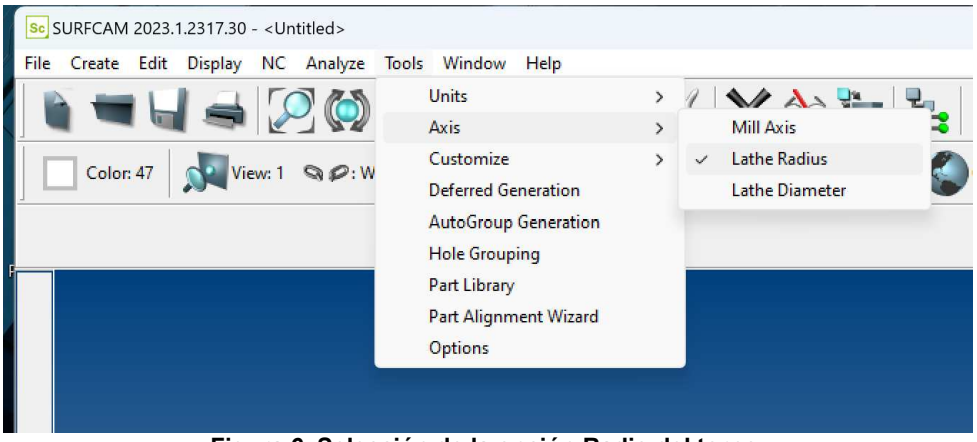


Figura 6. Selección de la opción Radio del torno.

Para seleccionar la unidad de longitud milímetros, se accede al menú desplegable de Herramientas/Tools / Unidades / milímetros, como se muestra en la Figura 7.

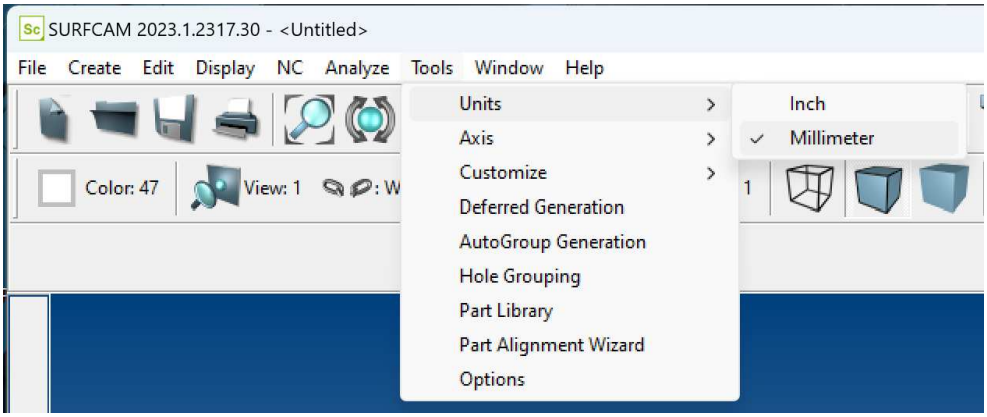


Figura 7. Configuración de unidades en milímetros.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 27, pp. 395 - 412.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Fase 2. Dibujar geometría para la operación refrentado

Se dibujan las siguientes líneas: a) La de color amarillo representa el inicio del material y b) La de color rojo representa el límite del maquinado. Los materiales cuando se cortan con segueta, la cara frontal del material no queda uniforme por esta razón esta es la primera operación que se realiza, como se muestra en la Figura 8.

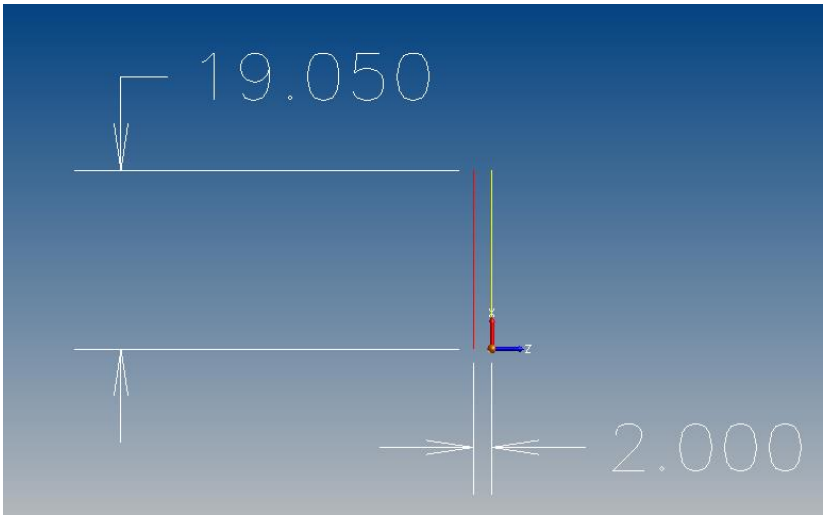


Figura 8. Geometrías para refrentar.

Fase 3. Programación de la operación del refrentado

a) Se configura las dimensiones del material a trabajar en SURFCAM, como se muestra en Figura 9.

1. Seleccionar el material “cilindro”
2. Escribir la longitud del eje -100.00
3. Especificar el diámetro del material a trabajar 38.24
4. Dar clic izquierdo en el botón agregar
5. Finalmente seleccionar el botón aceptar

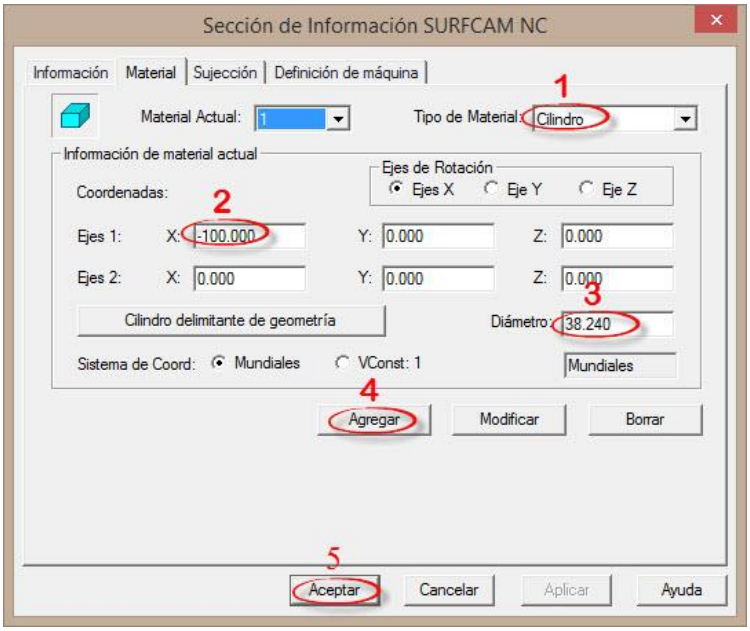


Figura 9. Menú para especificar las dimensiones del material.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 27, pp. 395 - 412.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

b) Programación de la **Operación Refrentado "Careado"**, considere la Figura 10:
   1. En el menú NC ubicamos el cursor en la opción "Torno" y se desplegarán las opciones de torneado.
   2. De un clic izquierdo en la opción Carear.

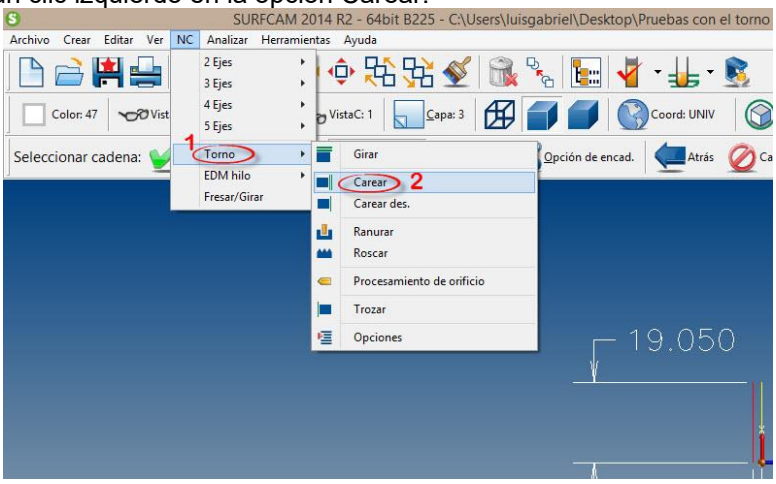


Figura 10. Operaciones de torneado en SURFCAM.

c) La Configuración de la **Información de Herramienta** se muestra en la Figura 11 y se describe a continuación:
   1. Seleccione el inserto VNMG433B
   2. Escribir el número 1 para indicar la posición de la herramienta y el 54 para las coordenadas de trabajo.
   3. Velocidad del husillo 800 RPM en sentido horario.
   4. Velocidad de avance 0.5 mm por revolución.
   5. Avance de penetración 0.075

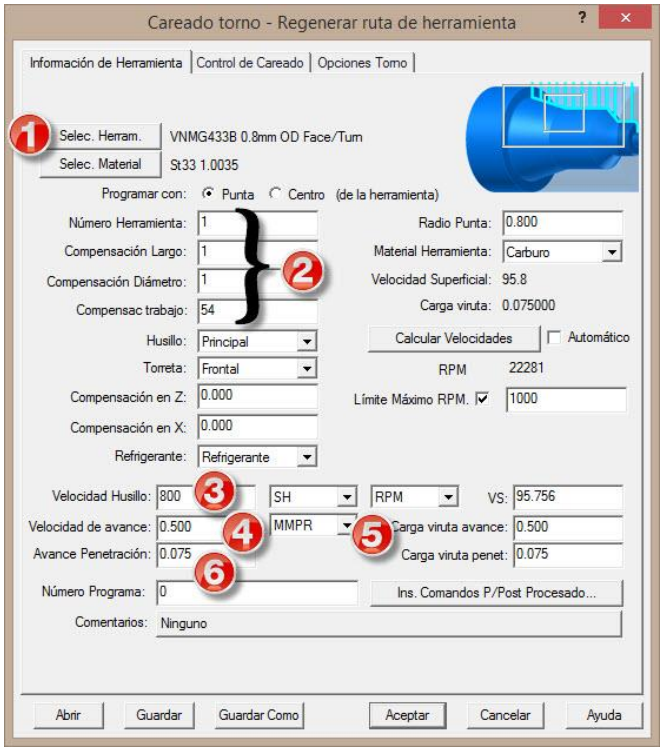


Figura 11. Configuración de la herramienta en SURFCAM.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 27, pp. 395 - 412.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

d) La Configuración del **Control de Careado**, realice el procedimiento que se muestra en la Figura 12, y se describe a continuación:
   1. Seleccionar careado de diámetro exterior.
   2. Definir la profundidad de corte de desbaste es de 0.6 mm, es decir por pasada estar cortando 1.2 mm.
   3. Establecer un buen corte de acabado de 0.010 mm
   4. Y finalmente aceptar la configuración.

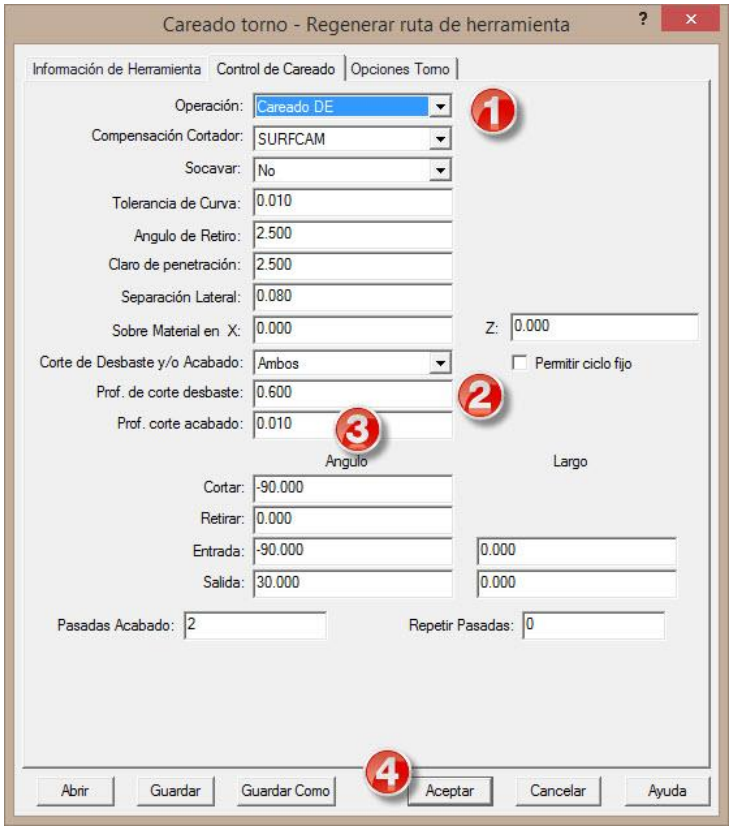
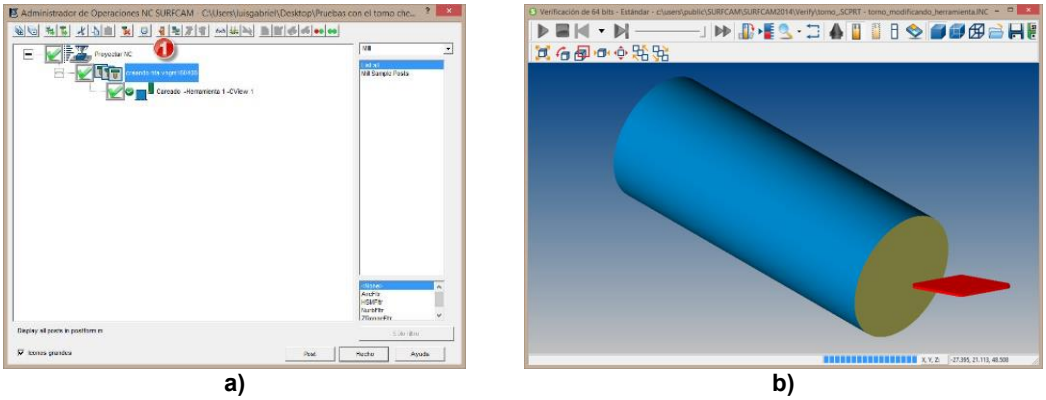


Figura 12. Configuración del careado en SURFCAM.

e) La simulación de maquinado de la operación refrentado, se muestra en la Figura 13, y se describe a continuación:
   1. De un clic izquierdo en el botón de ejecutar SURFCAM.
   2. De un clic izquierdo en el botón Play para que ejecute la simulación.
   3. Resultado de la simulación.



a) **b)**

Figura 13. a) Administrador de operaciones y b) Simulación del material.

Fase 4. Dibujar geometrías del contorno de la probeta

La Figura 14, muestra tres líneas, la línea de color rojo punteada representa el radio del material, la trayectoria en color blanca representa las dimensiones de la probeta y la línea punteada en color blanco representa el eje central de la pieza a maquinar.

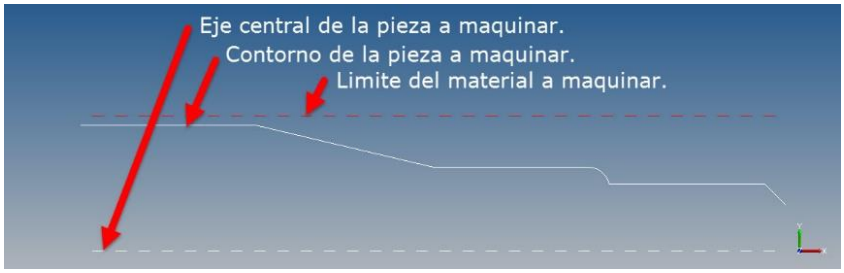


Figura 14. Significado de las líneas para el cilindrado en SURFCAM.

a) Programación de la operación cilindrado
La Figura 15, muestra el significado de las líneas a maquinar y el procedimiento se describe a continuación:
1. Seleccionar la geometría a maquinar: NC/Torno/Girar/Opción de encad./Encadenar elementos planares “Si”/Aceptar/Encadenar “dar clic izquierdo en A y finalmente en “B”/Hecho/Configurar herramienta con los mismos parámetros que en el refrentado.
2. Finalmente aceptar.

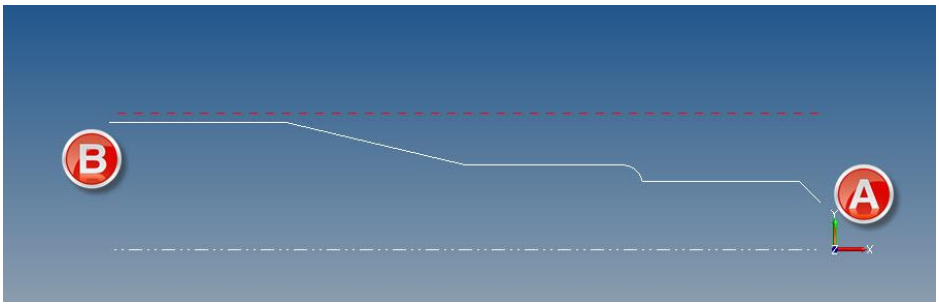
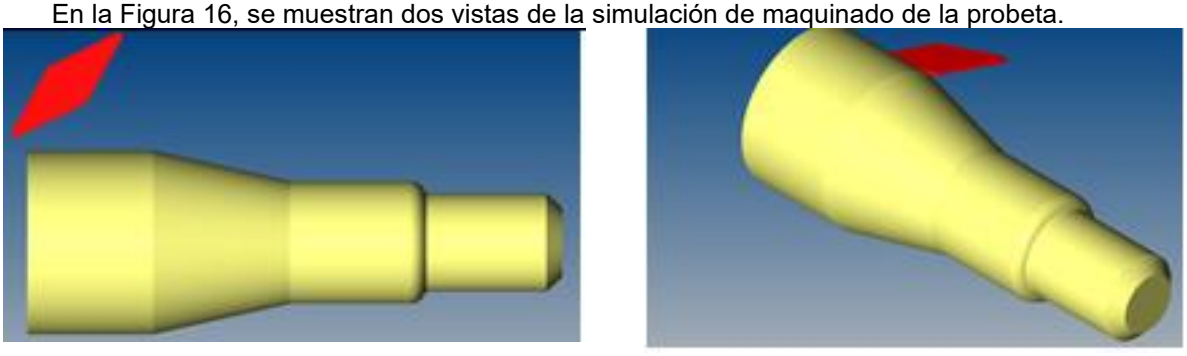


Figura 15. Selección del perfil para el cilindrado en SURFCAM.

b) Simulación del cilindrado

En la Figura 16, se muestran dos vistas de la simulación de maquinado de la probeta.



a) **b)**

Figura 16. Simulación del maquinado de la probeta: a) Vista frontal de la probeta, y b) Vista en isométrico realizadas en SURFCAM.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 27, pp. 395 - 412.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

c) Generación de códigos G y M

SURFCAM en su librería cuenta con 5 post procesadores, para control Fagor. Después de analizar los códigos que generaba cada uno de ellos y de ejecutarlos se encontró que es compatible con el Fagor Lathe.L2. La Figura 17, muestra una parte del código que se generó.

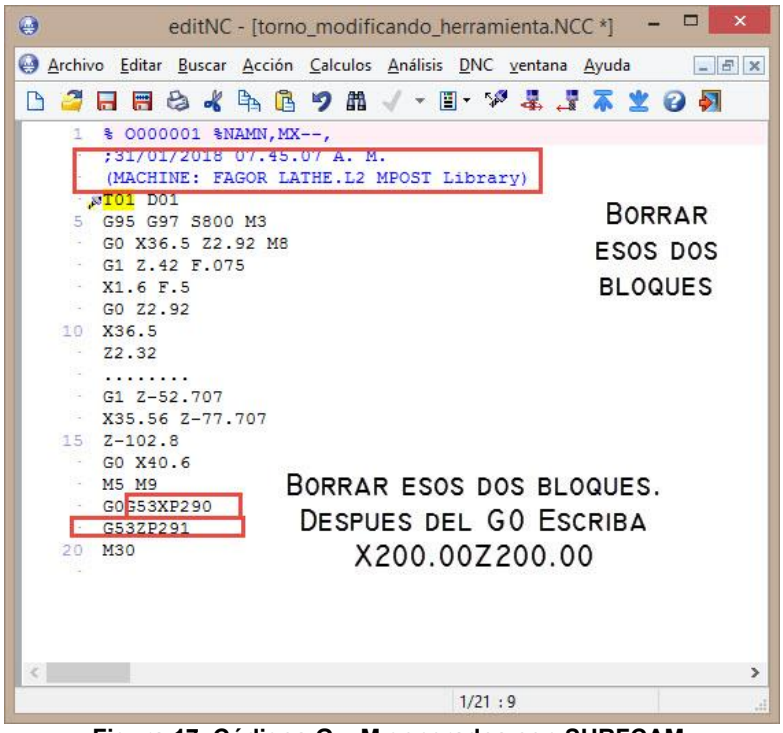


Figura 17. Códigos G y M generados con SURFCAM.

**Nota: Para que el postprocesador lea el código es importante que su nombre sea de 6 dígitos, de preferencia escribimos la fecha y la extensión del archivo debe de ser .pit

Fase 5. Maquinado de probeta

a) Sujeción de barra cilíndrica en el Chuck del torno

El torno tiene un Chuck de tres mordazas, la probeta que se mecanizará tiene una longitud de 100 mm por esta razón se deja salida 130 mm, para evitar colisiones.

Figura 18. Sujeción de la barra de aluminio a maquinar.

b) Se calibra la herramienta de corte con los datos que aparecen en la pantalla.

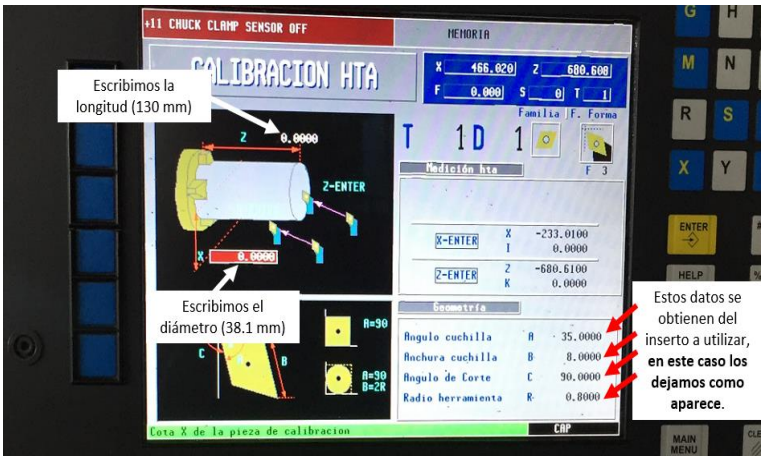


Figura 19. Configuración de la herramienta en la interfaz del control Fagor.

**Nota: Antes de maquinar se manda a casa “home”.

c) Finalmente se maquina la pieza y se obtiene el siguiente resultado.

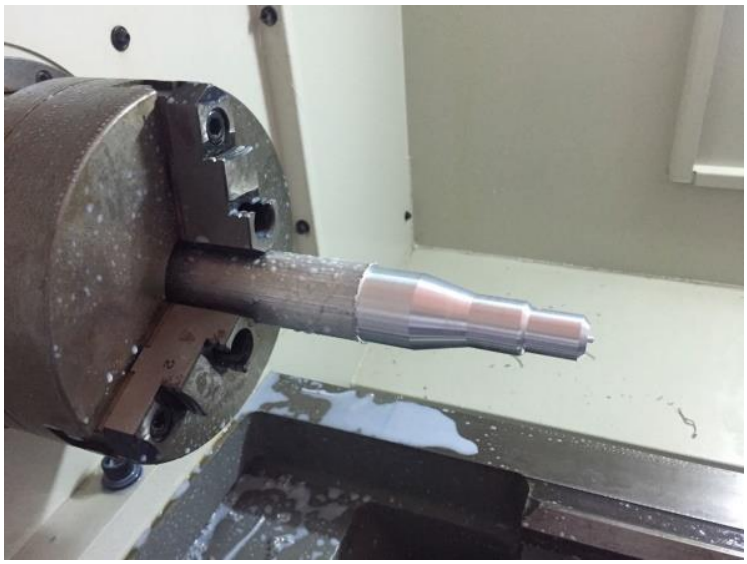


Figura 19. Maquinado de la probeta.

**Nota: Las dimensiones de la pieza maquinada corresponden a las realizadas en el diseño.

4. Conclusiones

La puesta en marcha de una máquina CNC, requiere bastante tiempo para leer manuales, consultar proveedores tanto del CNC como del software a utilizar y la pericia para interpretar los códigos que se generan cuando se post procesa la programación y finalmente ejecutar el programa en dos etapas, una en el simulador del CNC y la definitiva ya en la máquina, activando la opción de bloque por bloque, para que ante un movimiento no deseado, contar con tiempo suficiente para detener el CNC con el paro de emergencia y evitar una posible colisión o accidentes.

5. AGRADECIMIENTO

Agradecer al Tecnológico Nacional de México por el apoyo recibido para realizar el proyecto titulado “Desarrollo de materiales didácticos para potenciar la formación de estudiantes en torno CNC” con clave 21209.24-P. Así como a las honorables autoridades del Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, representadas por el Director, Dr. Sergio Octavio Rosales Aguayo y a la Subdirectora Académica Dr. María Guadalupe Sánchez Cervantes quienes con su apoyo encausan los esfuerzos de la comunidad docente para desarrollar recursos académicos que coadyuven al proceso de formación de los estudiantes.

6. Referencias

[1] «Línea Del Tiempo Del CNC». Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://lineadetiempo.top/linea-del-tiempo-del-cnc/
[2] «Historia y evolución de las fresadoras CNC». Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.haascnc.com/es/Community/Contenidos/fresadora-cnc.html
[3] Hidalgo, M. A., Cardona, J. D., Rojas, F. A., & Mec, E. “Diseño de un Entorno Virtual para la Enseñanza de Procesos de Mecanizado”.
[4] «Torno CNC de máquinas y herramientas». [en línea]. [Consulta: 10 de septiembre de 2024]. Disponible en: http://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/tornocnc
[5] S. Kalpkjian, “Manufactura ingeniería y tecnología”, México Pearson, 2008.
[6] B. C. S. Corp, “Introducción A Surfcam Prácticas De Centro De Maquinado”. Accedido: 8 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://buk.com.mx/9786079908645/description
[7] M. Donley, «Los problemas más comunes de las máquinas CNC», Setco. Accedido: 8 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.setco.com/es/blog/the-most-common-cnc-machine-issues/
[8] Metalmecánica, «CNC: todo lo que debe saber sobre el control numérico computarizado», Metalmecánica. Accedido: 8 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.metalmecanica.com/es/noticias/todo-lo-que-debe-saber-sobre-el-control-numerico-por-computadora-o-cnc
[9] Orejuela, J., Aguinaga, A., & Llulluna, F. (2014). “Desarrollo de interfaces de integración CAD-CAMa través del sistema de manufactura virtual para el aprendizaje asistido por computadora de la programación y manejo de controladores de máquinas CNC”. *Revista Politécnica*, *34*(1), 1-6.
[10] Mohd Andrie, N. A. A. (2022). “Generation of G-Code on aluminum blocks using vertical CNC machine”.
[11] SolidWorks (Dassault Systemes). Accedido: 10 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.solidworks.com/es/partner-product/surfcam
[12] «¿Qué son los insertos de corte?» Accedido: 8 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.coroimport.com/publicacion.php?id=95
[13] «¿Cuál es la diferencia entre plaquitas de torneado positivas y negativas? - Conocimiento». Accedido: 8 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.cqcuttingtools.com/info/what-is-the-difference-between-positive-and-ne-95394129.html
[14] «Portaherramientas de torneados exteriores: ¿Qué son y qué tener en cuenta al momento de identificarlos?». Accedido: 8 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://sinpar.com.ar/portaherramientas-de-torneados-exteriores-que-son-y-que-tener-en-cuenta-al-momento-de-identificarlos/
[15] «Tipos de Portaherramientas para Torno y Cómo Elegirlos». Accedido: 8 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.cmz.com/es/tipos-de-portaherramientas-para-tornos/
[16] «SISTEMAS CAD/CAE/CAM/CAPP». Accedido: 8 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.clubensayos.com/Tecnolog%C3%ADa/SISTEMAS-CADCAECAMCAPP/380195.html
[17] L. C, «Los mejores softwares CAD para todos los niveles», 3Dnatives. Accedido: 8 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.3dnatives.com/es/mejores-softwares-cad-programa-180320192/

[18] «CAD/CAM Solutions for Manufacturing | Mastercam», mastercam.com. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.mastercam.com/es/
[19] «SURFCAM | Software para la Fabricación Asistida por Ordenador (CAD/CAM)», Hexagon. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://hexagon.com/es/products/product-groups/computer-aided-manufacturing-cad-cam-software/SURFCAM
[20] Administrator, «POWERMILL», 3dcadportal.com. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.3dcadportal.com/delcam-powermill.html
[21] «SOLIDWORKS CAM», SOLIDWORKS. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.solidworks.com/es/product/solidworks-cam
[22] «Inventor CAM: Software integrado para procesos CNC», SemcoCAD. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.semco.com.pe/inventor-cam/
[23] «CATIA», Dassault Systèmes. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.3ds.com/products/catia
[24] «Programación de máquinas de CNC con códigos G&M», TecnoEdu.com. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://tecnoedu.com/CNC/GM.php
[25] «Fagor CNC 8055 T Manual De Operación (Página 277 de 512) | ManualsLib». Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.manualslib.es/manual/197142/Fagor-Cnc-8055-T.html?page=277#manual

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 28, pp. 413 - 430.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Propuesta Metodológica para Buenas Prácticas de Trabajo con Microcontroladores en el Aula

Ramos Arreguín Juan Manuel*, Pedraza Ortega Jesús Carlos, Aceves Fernández Marco Antonio, Tovar Arriaga Saúl y Gorrostieta Hurtado Efrén

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería
* Autor de correspondencia: jsistdig@yahoo.com.mx

Resumen

La enseñanza con microcontroladores en el aula enfrenta muchos retos, y uno de ellos es que el estudiante aproveche las ventajas de los lenguajes de programación. Por lo general, se les enseña a resolver un problema, sin importar la extensión del código, por lo que, en ocasiones, se desaprovecha la potencia del microcontrolador en sí. Es por eso que en este trabajo se hace una propuesta de metodología de desarrollo de programas para microcontroladores usando un lenguaje estructurado como C, y cuidando trabajar de una manera ordenada, y que al final se pueda contar con un código con que requiera la menor cantidad posible de memoria de programa, además de que se aprenda a analizar dicho código. Para validar la metodología propuesta, se desarrollan algunos proyectos sencillos que permitan al estudiante comprender los pasos a seguir, así como realizar un análisis de código para obtener soluciones con la menor cantidad de memoria de programa posible, manteniendo la misma funcionalidad.

Palabras clave: Enseñanza, microcontroladores, metodología, lenguaje estructurado.

1. Introducción

La programación en microcontroladores hoy en día es algo muy común, y en ocasiones, relativamente sencillo, dependiendo del microcontrolador y de la plataforma a usar. Algunos de los principales fabricantes de microcontroladores son Atmel, Freescale, Intel Corporation, Microchip, National Semiconductor, PICAXE, Texas Instruments, Zilog, entre otros.

En consecuencia, existe una gran variedad de familias de microcontroladores y microprocesadores, para el desarrollo de soluciones a problemas de ingeniería. A pesar de esto, no siempre podemos tener a disposición todos los modelos que pudiéramos desear. En una búsqueda de vendedores de microcontroladores, se encontró que en el mercado comercial se pueden encontrar fácilmente microcontroladores de diversos fabricantes. Por ejemplo, de Texas Instruments se encontró un modelo, de microcontroladores Atmel se encontraron 13 modelos, y de Microchip se encontraron 45 modelos del microcontrolador PIC y 6 de PICAXE. También es posible encontrar una gran variedad de tarjetas de desarrollo o entrenadoras para microcontroladores, de fabricantes como Texas Instruments, ST Microelectronics, Microchip.

En algunos casos, se usan microprocesadores de una manera limitada, de manera que el módulo es vendido como microcontrolador. Como ejemplo de esto, tenemos el ESP32, Raspberry Pi Pico, entre otros.

Sin embargo, a nivel educativo, en las asignaturas donde los estudiantes deben aprender a programar un microcontrolador, es muy común el uso de dispositivos de Microchip, Atmega y en ocasiones, Texas Instruments o ST Microelectronics. Para el estudiante debe quedar claro que, una vez que se aprende a programar un microcontrolador, puede ser más fácil aprender a programar uno de otra marca, pero se debe estar consciente de que existe una gran variedad de microcontroladores que pueden ayudar a resolver un problema de ingeniería.

1.1 Tendencias de los microcontroladores

A partir del año 2020, estamos viviendo un incremento en la importancia del uso de microcontroladores en la vida diaria. Esto se debe especialmente al desarrollo de tecnologías inteligentes. En el caso de los microcontroladores, éstos funcionan como base del sistema embebido, los cuales pueden ser aplicados en diversas áreas de la vida diaria como son: industria automotriz, salud, entretenimiento, línea blanca, entre otros.

Según Fleischer [1], el desarrollo de microcontroladores para el año 2024 incluye:

1. Integrar sistemas de comunicación inalámbrica, seguridad, eficiencia energética
2. Mejorar la eficiencia energética.
3. Seguridad avanzada.

1.2 Fabricantes de microcontroladores.

Actualmente, existe una gran variedad de fabricantes de microcontroladores, de los cuales se muestran algunos en la tabla 1.

Tabla 1. Fabricantes de microcontroladores[1].

Fabricante		
AMCC	Infineon	Silabs
Altera	Intel	Silicon Motion
Analog Devices	Lattice Semiconductor	STMicroelectronics
Atmega	Microchip Technology	Texas Instruments
Cypress Microsystems	National Semiconductor	Toshiba
Dallas Semiconductor	NXP Semiconductors	Western Design Center
Energy Micro AS	NEC	Ubicom
EPSON Semiconductor	Parallax	Xemics
Freescale Semiconductor	Propeller	Xilinx
Fujitsu	Rabbit Semiconductor	ZiLOG
Holtek	Renesas Technology	

Por lo general, las tiendas de electrónica y algunas páginas de internet cuentan con los modelos de microcontroladores que más se venden, como pueden ser: ATMEGA328P, PIC16F877A, PIC18F4550, entre otros. Así mismo, se cuenta con una gran variedad de sistemas de desarrollo basados en microcontrolador, como pueden ser: STC89C52, Raspberry Pi Pico, STM32F407, RP2040, Arduino, STM32F401RE, entre otros.

Como se puede ver, existe una gran variedad de fabricantes y modelos de microcontroladores. Sin embargo, son muy pocos los modelos de microcontrolador que los estudiantes llegan a usar durante sus estudios de alguna licenciatura que incluya el aprendizaje con microcontroladores. A pesar de esto, si el estudiante aprende a trabajar bien con un microcontrolador, y comprende la teoría relacionada a

[1] https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Microcontroladores_comunes (consultado el 18 de septiembre del 2024)

su funcionamiento, será más sencillo que pueda usar otro microcontrolador, que puede ser del mismo fabricante, o bien, de un fabricante diferente.

Lo anterior, es posible, especialmente ahora que se ha generalizado el uso de lenguajes de alto nivel, como C/C++, entre otros. Lo que permite que sea más sencillo que un programa diseñado para un modelo en particular se pueda usar para programar un microcontrolador de un fabricante diferente con algunos ajustes en el código. Algunos ejemplos de plataformas para programación de microcontroladores tenemos PIC C Compiler[2], Atmel Studio[3], Microchip Studio[4], entre otros.

En el área educativa, existen esfuerzos por vincular el desarrollo de la Inteligencia Artificial al uso de microcontroladores en el área educativa [2], así como el desarrollo de módulos enfocados a mejorar el aprendizaje de microcontroladores [3], [4]. Sin embargo, aún es necesario enfrentar algunos retos, como es el análisis del código. En este trabajo nos enfocamos en presentar una propuesta de metodología para que los estudiantes puedan diseñar de una mejor manera una solución basada en microcontrolador, y que sirva especialmente a los que van iniciando. A continuación, se muestra la propuesta de la metodología.

2. Metodología

Es común en un estudiante que se está iniciando en el trabajo con microcontroladores, querer comenzar rápidamente a escribir programas y resolver problemas. Sin embargo, es rara la ocasión en que se lleva a cabo una planeación antes de iniciar a trabajar con el microcontrolador. Aun cuando el estudiante ya tenga cierta experiencia en programar microcontroladores, en ocasiones se pasan algunos detalles por alto, lo que ocasiona errores de implementación, que se pueden evitar si se trabaja de una manera organizada. En la Figura 1 se muestra una propuesta de metodología para el trabajo con microcontroladores.

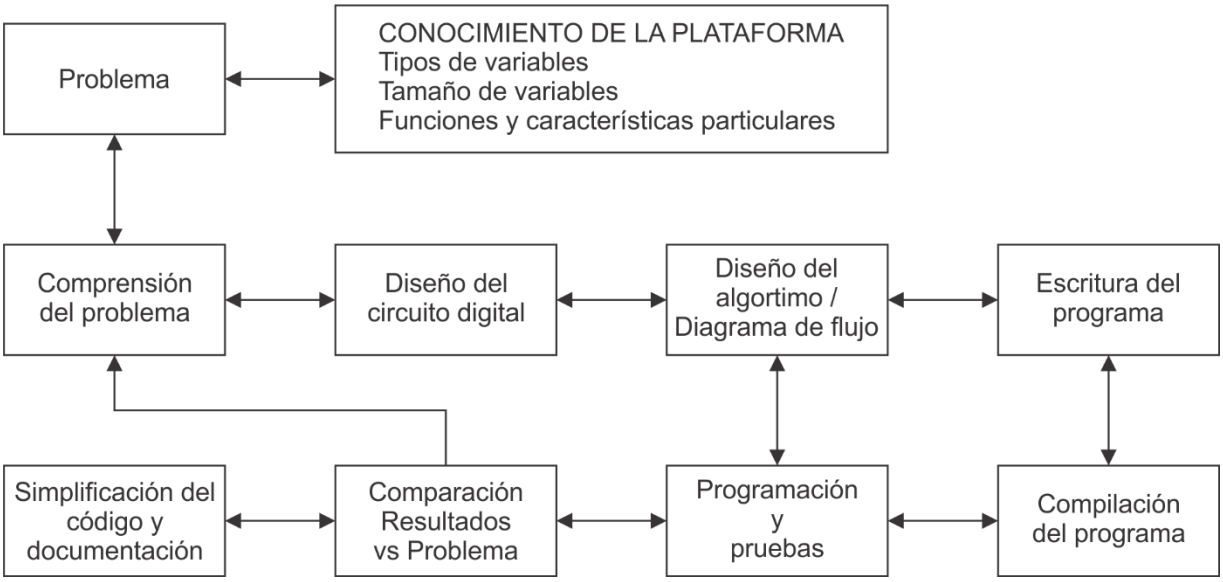


Figura 1. Metodología propuesta para el trabajo con microcontroladores.

[2] https://www.ccsinfo.com/compilers.php (consultado el 18 de septiembre del 2024)
[3] https://atmel-studio.software.informer.com/ (consultado el 18 de septiembre del 2024)
[4] https://www.microchip.com/en-us/tools-resources/develop/microchip-studio (consultado el 18 de septiembre del 2024)

En esta metodología, se da por hecho que el estudiante se ha familiarizado con la plataforma, especialmente con las funciones que manejan, así como las características de los tipos de variables que se manejan. A continuación, se detalla un poco más cada etapa de la metodología.

2.1 Conocimiento de la plataforma

Este punto es importante, pues, aunque se está usando el lenguaje estándar C/C++, existen algunas diferencias entre plataformas que pueden provocar algunos errores cuando se cambia de plataforma de programación. Algunas de las plataformas que podemos encontrar actualmente para programar microcontroladores, se pueden encontrar bajo el concepto de Entorno de Desarrollo Integrado (IDE, Integrated Development Environment) se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Características principales de algunos IDE .

IDE	Lenguaje	Ventajas	Desventajas
MPLAB X IDE (Microchip) [6]	C/C++	Soporta una gran variedad de familias de microcontrolador PIC y AVR.	Es complejo de usar si no se tiene experiencia.
Microchip Studio (antes Atmel Studio) [7]	C/C++, ensamblador	Soporta AVR y ARM de microchip.	Exclusivo para AVR, ARM y SAM.
CCS C Compiler [8]	C, ensamblador	Fácil de usar. Soporta una amplia variedad de la familia PIC. Amplio soporte para trabajar con módulos existentes en el mercado.	Se requiere licencia de paga. Difícil de usar para programas en ensamblador.
Arduino [9]	C/C++	Trabaja con las familias Atmega, ARM, ESP-32, ESP8266, SAMD Cuenta con amplio soporte en Internet.	Difícil de depurar. Baja eficiencia para trabajar en ambientes industriales o de bajo nivel.
PlatformIO [10]	C/C++, Python	Soporta microcontroladores AVR, ARM Cortex-M, ESP32, ESP8266, STM32, MSP430. Fácil de usar.	Difícil de usar y configurar.
Keil µVision [11]	C/C++, ensamblador	Soporta las familias ARM Cortex-M, STM32, LPC. Muy usado para aplicaciones industriales.	Se requiere licencia de pago.
STM32 Cube [12]	C/C++	Soporta microcontroladores de la familia STM32. Se puede realizar depuración avanzada. Es gratuito.	Exclusivo para STM32
IAR Embedded Workbench [13]	C/C++, ensamblador	Soporta AVR, ARM, MSP430, PIC. Muy usado en la industria. Alto rendimiento. Bajo consumo de energía.	Se requiere licencia de pago.
Code Composer Studio [14]	C/C++, ensamblador	Soporta las familias MSP430, ARM Cortex-M, C2000, Sitara, Tiva C. Específico para microcotroladores de Texas Instruments (TI). Herramientas de simulación.	Complejo de usar.

También es importante verificar el tamaño de variable de cada uno de los IDE mencionados en la Tabla 2, dado que no necesariamente son los mismos. Esto lo define cada diseñador del IDE. Lo mismo ocurre con las funciones, dado que no todos los IDE manejan las mismas funciones.

2.2 Problema.

Representa la situación que se desea resolver usando un microcontrolador. El problema debe de ser planteado de la manera más clara posible, y en su caso, apoyarse con ejemplos.

2.3 Comprensión del problema.

Esta es la parte más importante en el diseño de un sistema digital basado en microcontrolador. Se debe comprender bien el problema, pero especialmente la manera de poder resolverlo. Se recomienda hacer varios ejercicios, hasta que no existan dudas sobre el problema ni la solución.

2.4 Diseño del circuito digital.

Una vez que está claro la manera de resolver el problema, se debe hacer un diseño del circuito digital, para poder determinar qué puertos y/o terminales se van a usar, definiendo de una manera clara cuáles serán entradas o salidas. También nos permite tener una idea del tipo de variables a usar, especialmente teniendo en cuenta las características de la plataforma de programación.

En esta etapa es importante que el estudiante esté familiarizado con el uso de la plantilla de prácticas (protoboard), o bien, con el uso de una tarjeta de desarrollo basado en microcontrolador.

2.5 Diseño del algoritmo / diagrama de flujo.

Una vez que se tiene claro el problema, así como la manera de resolverlo usando un microcontrolador, se debe establecer los pasos a seguir para la solución. Se puede establecer el diseño de un algoritmo, especificando los pasos a seguir, o bien, diseñando un diagrama de flujo. El diagrama de flujo permite visualizar de una manera gráfica la secuencia del programa, siendo más fácil su escritura.

2.6 Escritura del programa.

Ahora que tenemos una mejor idea de la manera de resolver el ejercicio, podemos proceder a la escritura del programa en el lenguaje de nuestra preferencia. Es importante tomar en cuenta que las instrucciones básicas no cambian, como es asignación de valores, declaración de variables, ciclos, entre otros. Sin embargo, algunas funciones son propias exclusivamente de la plataforma de programación, y los tamaños en bytes de las variables podrían cambiar un poco de una plataforma a otra, por lo que se recomienda informarse primero de las instrucciones particulares de cada plataforma.

2.7 Compilación del programa.

Una vez escrito el programa, se debe compilar para que se genere el archivo de programación del microcontrolador. En caso de que se generen errores, se debe regresar al paso anterior, para corregir el programa. Cuando la compilación está libre de errores, se genera el archivo de programación, cuya extensión del archivo puede ser hex, bit, entre otros, dependiendo del software y del hardware usado.

2.8 Programación y pruebas.

Una vez compilado el programa de manera exitosa, se procede a programar el microcontrolador, para probar la funcionalidad y registrar los resultados. Se debe tomar en cuenta que cada programador usa su propio software, por lo que el usuario debe asegurarse de contar con el programa correcto.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 28, pp. 413 - 430.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

2.9 Comparación de resultados vs problema.

Ya que se tienen los resultados, se debe verificar que el problema planteado ha sido resuelto. Si se tienen errores, se debe regresar a la comprensión del problema y verificar que no se han omitido detalles. A partir de este punto, se debe proceder a revisar cada uno de los pasos, hasta encontrar el error. Si se verifica que el problema ha sido resuelto, entonces podemos pasar al último paso.

2.10 Simplificación del código y documentación.

Resuelto el problema, se recomienda tratar de hacer más eficiente el código, ya sea reduciendo código o espacio de memoria de programa. Posteriormente, podemos proceder a documentar la solución mediante la documentación correspondiente. Esto incluye el diagrama electrónico, algoritmo o diagrama de flujo, pruebas y resultados.

3. Aplicación de la metodología en 2 casos de estudio

A continuación, se muestran algunos casos de estudio, donde se puede mostrar la aplicación de la metodología planteada en la figura 1. El caso de estudio se realiza considerando el uso del microcontrolador PIC18F4550 [15].

3.1 Secuencia de luces unidireccional.

PROBLEMA. En este caso de estudio, se requiere generar una secuencia de leds, en un solo sentido y en todo momento, se encuentre encendido solamente un led. La secuencia incluye 8 leds, y el cambio debe realizarse cada 0.1 segundos (100 ms).

COMPRENSIÓN DEL PROBLEMA. La secuencia de corrimiento se muestra en leds, donde un led encendido equivale un 1 lógico, y un led apagado a un 0 lógico, como se ve en la Figura 2. Los 8 leds son controlados por medio de un puerto.

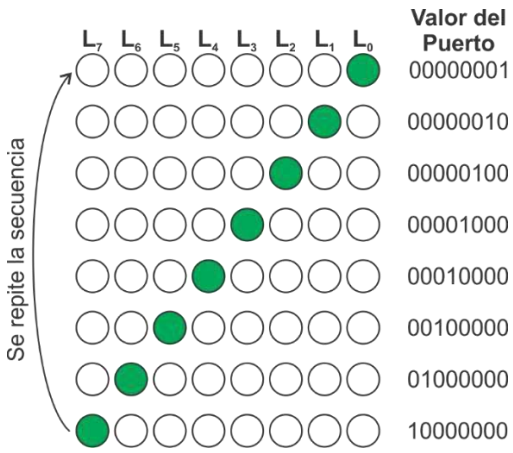


Figura 2. Secuencia de corrimiento unidireccional de 8 bits.

DISEÑO DEL CIRCUITO DIGITAL. El circuito propuesto se muestra en la Figura 3, donde se usa el puerto RB para la generación de la secuencia planteada en el problema. Esto permite saber qué puertos van a ser usados, así como las terminales que se usarán como salida.

Cabe mencionar que se ha visto que, en ocasiones, algunos estudiantes no han usado las plantillas de prácticas, por lo que resulta de utilidad para ellos que puedan tener una guía para

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 28, pp. 413 - 430.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

implementar el circuito propuesto. Con esta finalidad, en la Figura 4 se muestra una propuesta de implementación del circuito de la Figura 3 en una plantilla de prácticas, usando 8 led´s de manera discreta. Por otro lado, en la Figura 5 se muestra una propuesta de implementación usando una barra de 10 leds, de los cuales en esta propuesta solamente se usan 8.

Así mismo, en la Figura 4 y en la Figura 5 se considera las conexiones del programador. En este caso, la mayoría de hardware para programar dispositivos PIC, permiten hacer una conexión en la plantilla de prácticas para la programación del microcontrolador sin retirarlo de la plantilla.

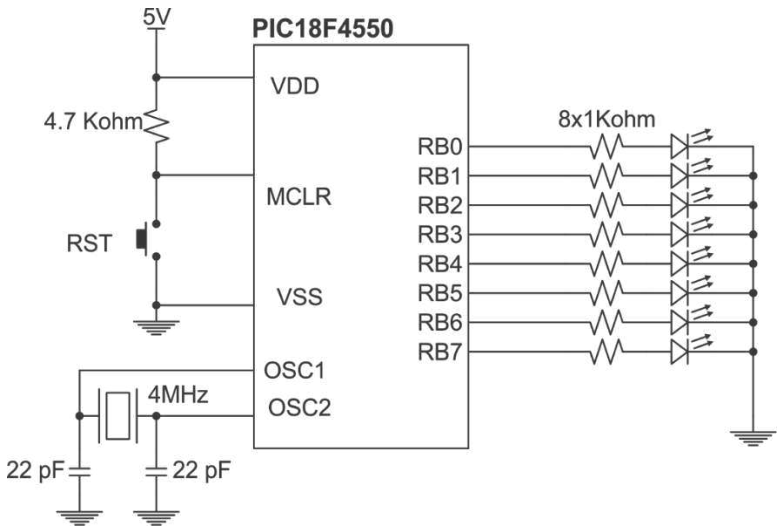


Figura 3. Circuito para la secuencia de corrimiento unidireccional de 8 bits.

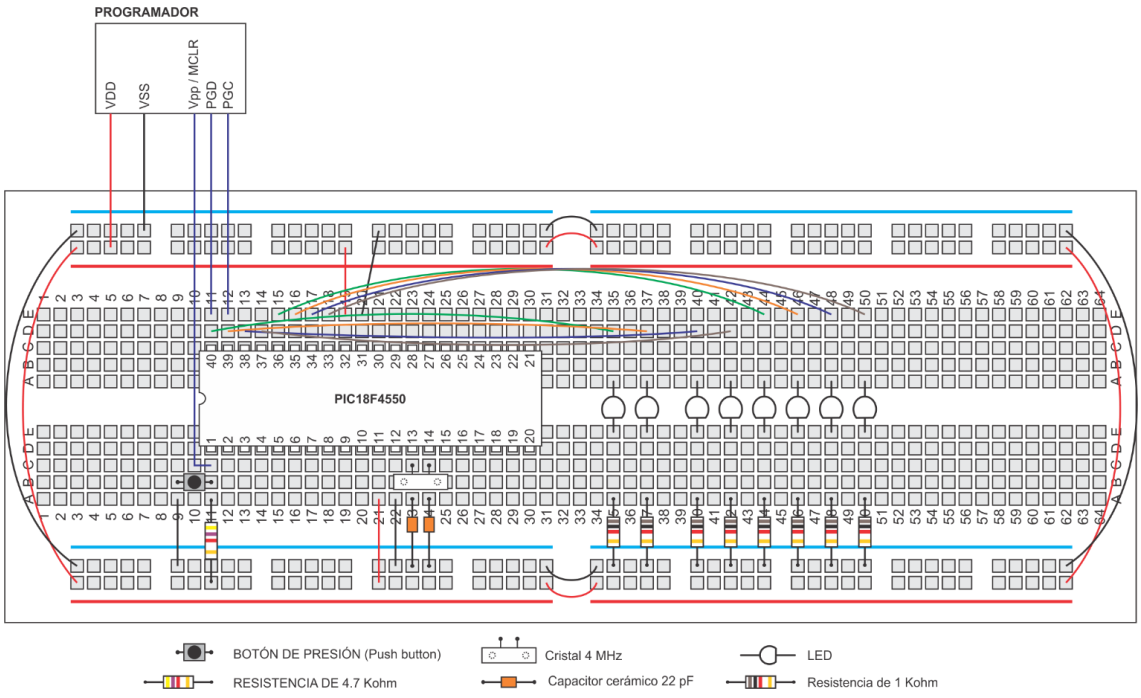


Figura 4. Implementación en plantilla de prácticas del corrimiento de 8 leds de manera discreta.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 28, pp. 413 - 430.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

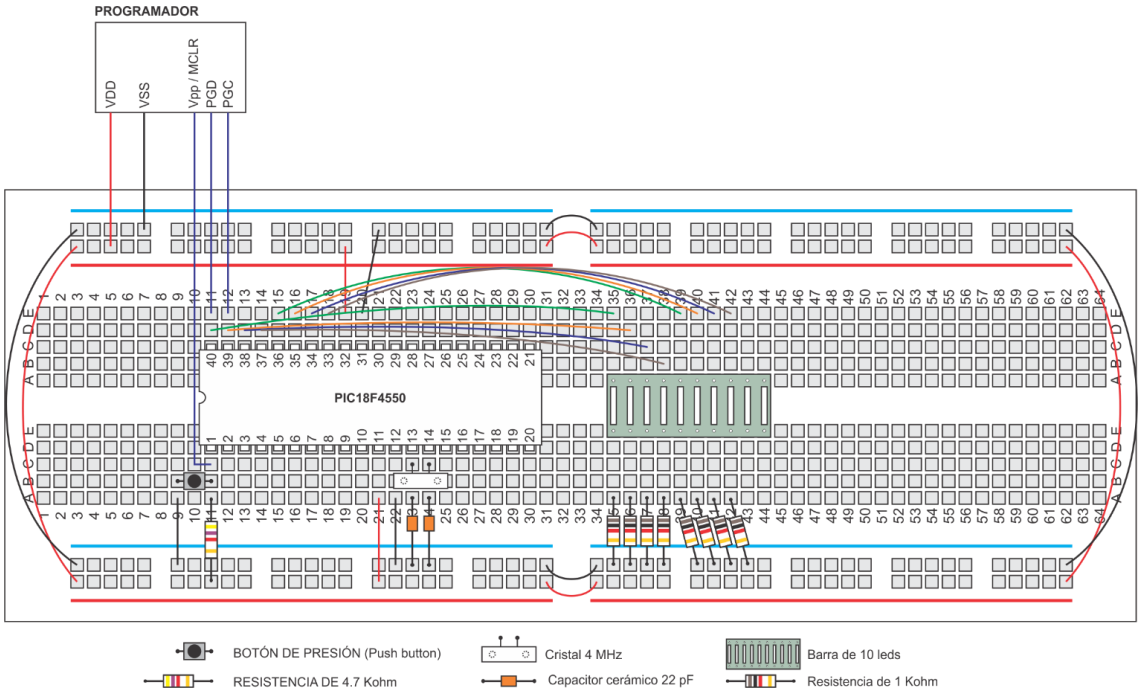


Figura 5. Implementación del corrimiento usando una barra de leds.

PROPUESTA DEL ALGORITMO. El Algoritmo 1 muestra una propuesta de los pasos a seguir para resolver el problema planteado. También podemos definir las variables a usar, así como la configuración del puerto y los pasos a seguir. El diagrama de flujo correspondiente al algoritmo se muestra en la Figura 6.

Algoritmo 1. Secuencia de corrimiento unidireccional de 8 bits.

Paso	*Acción*
1.	*Definición de variables a usar. Entero de 8 bit, de nombre C.*
2.	*Configuración del microcontrolador. Puerto B como salida.*
3.	*Se asigna a C el valor de 1.*
4.	*Se escribe el valor de C al Puerto B.*
5.	*Retardo de 100 ms.*
6.	*Corrimiento de C a la izquierda.*
7.	*¿Es C = 0? Si: ir al paso 3. No: ir al paso 4.*

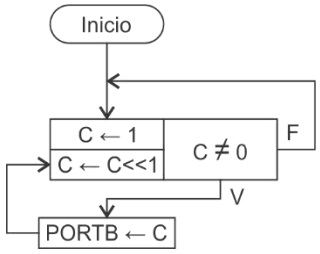


Figura 6. Diagrama de flujo para corrimiento unidireccional de 8 bits.

CÓDIGO DEL PROGRAMA. El programa en CCS se muestra en el Código 1, donde se usan las funciones de escritura a puerto. Las escrituras y lecturas a puerto se presentan en el código como Rx,

donde x puede ser A, B, C, entre otros, dependiendo del puerto que se desea usar. De la misma manera, se omite la inicialización del microcontrolador, como la configuración de puertos, frecuencia de reloj, entre otros. Se maneja de esta manera para generalizar su uso en cualquier plataforma.

Código 1. Corrimiento unidireccional de 8 bits.

```
#include <18F4550.h>
#use delay(internal=4MHz)
#use FIXED_IO(B_outputs=PIN_B7,PIN_B6,PIN_B5,PIN_B4,PIN_B3,PIN_B2,PIN_B1,PIN_B0)

void main()
{
   int8 C;

   while(TRUE)
   {
      for(C=1;C!=0;C<<=1)   //C <<= 1 equivale a C = C << 1
      {
         RB = C;            //Se manda escribir al puerto B el valor de C
         delay(100);        //Retardo de 100 ms
      }
   }
}
```

3.2 Exhibición de valores en exhibidores de 7 segmentos.

PROBLEMA. En esta ocasión, se desea utilizar 4 exhibidores de 7 segmentos para mostrar cantidades en decimal. Es importante evitar que en los exhibidores se note un parpadeo. Es decir, la exhibición de los números se debe ver continua y con la misma intensidad en todos los segmentos.

COMPRENSIÓN DEL PROBLEMA. Para encontrar una solución, primero debemos comprender la funcionalidad de los exhibidores de 7 segmentos, especialmente los que tienen 4 en un mismo encapsulado.

La Figura 7 muestra un encapsulado de 4 exhibidores de 7 segmentos conectados en paralelo. Las terminales comunes son Exh1, Exh2, Exh3 y Exh4, y se conectan a tierra o alimentación, dependiendo si son cátodo o ánodo común. En nuestro caso, recomendamos el uso en de ánodo común, para que la fuente de alimentación sea la responsable de suministrar la corriente que requieren los exhibidores para funcionar.

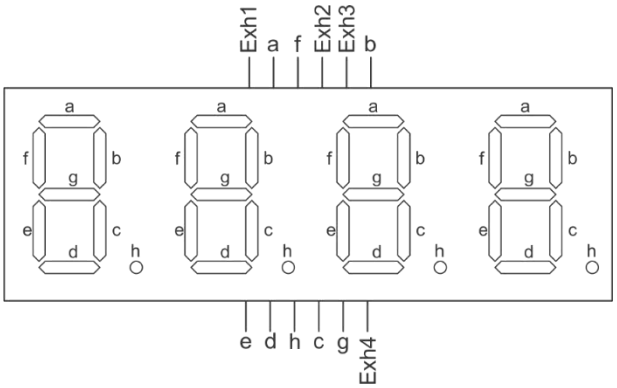


Figura 7. Encapsulado de 4 exhibidores conectados en paralelo.

La Figura 8 muestra la conexión de transistores PNP a exhibidores de ánodo común. La señal B es una señal de 4 bit, y se utiliza para activar los transistores que “encienden” (ON) o “apagan” (OFF)

un exhibidor específico. Si se desea encender el exhibidor 0, entonces el bit B_0 debe valer '0' y los demás deben valer '1', como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Valores de la señal B para Ánodo Común.

B3	B2	B1	B0	Exhibidor 3	Exhibidor 2	Exhibidor 1	Exhibidor 0
0	1	1	1	ON	OFF	OFF	OFF
1	0	1	1	OFF	ON	OFF	OFF
1	1	0	1	OFF	OFF	ON	OFF
1	1	1	0	OFF	OFF	OFF	ON

Una vez que se tiene claro cómo funciona el dispositivo de 4 exhibidores de 7 segmentos, podemos pasar al diseño del circuito digital.

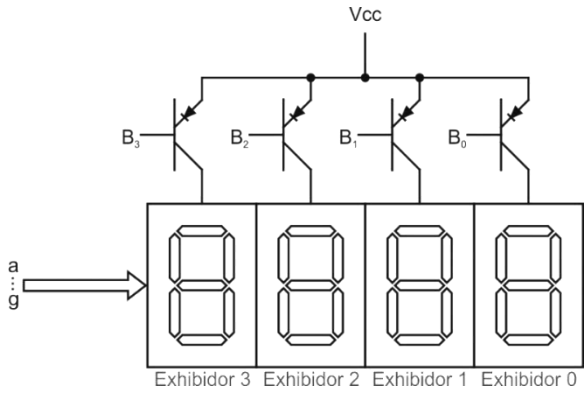


Figura 8. Conexión de exhibidores ánodo común con transistores PNP.

DISEÑO DEL CIRCUITO DIGITAL. La Figura 9 muestra el diagrama de conexión propuesto para el manejo de 4 exhibidores ánodo común en paralelo. Un ejemplo de cómo se puede implementar en plantilla de prácticas, se muestra en la Figura 10.

Es común encontrar en Internet que se puede activar los exhibidores directamente desde el microcontrolador, sin necesidad de los transistores. Sin embargo, nosotros consideramos que son necesario, para que no sea el microcontrolador quien deba soportar la demanda de corriente. Se ha visto en diversas ocasiones que, al conectar más cosas al microcontrolador, la demanda de corriente aumenta y llega el momento en que el dispositivo no soporta dicha demanda de corriente, por lo que se puede apagar o reiniciar continuamente.

Recordemos que, de acuerdo a la hoja de datos del microcontrolador PIC18F4550 puede dar un máximo de 25 mA en cada terminal, por lo que la corriente máxima de cada puerto no puede sobrepasar de 200 mA. Así mismo, la corriente total usada en el microcontrolador no debe exceder de 250 mA, pues puede sufrir daños irreversibles.

Por lo anterior, y por seguridad del microcontrolador, se propone el diagrama esquemático de la Figura 9, usando los transistores para disminuir la carga de corriente al microcontrolador.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 28, pp. 413 - 430.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

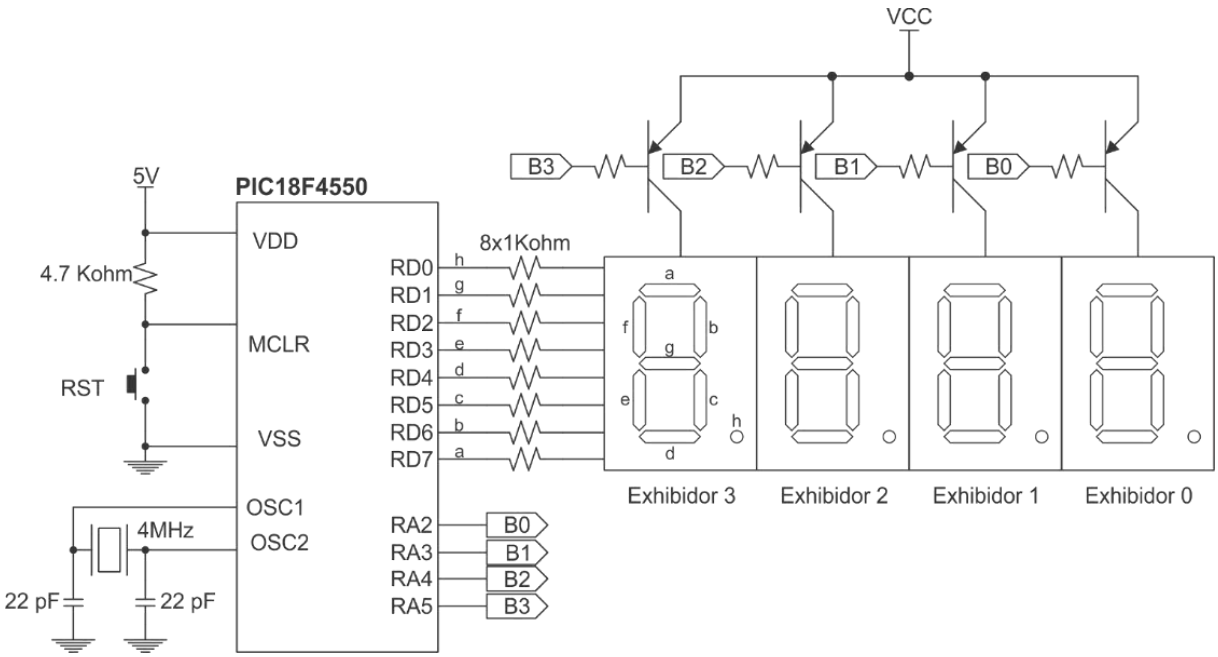


Figura 9. Conexiones propuestas para manejar 4 exhibidores ánodo común de 7 segmentos en paralelo.

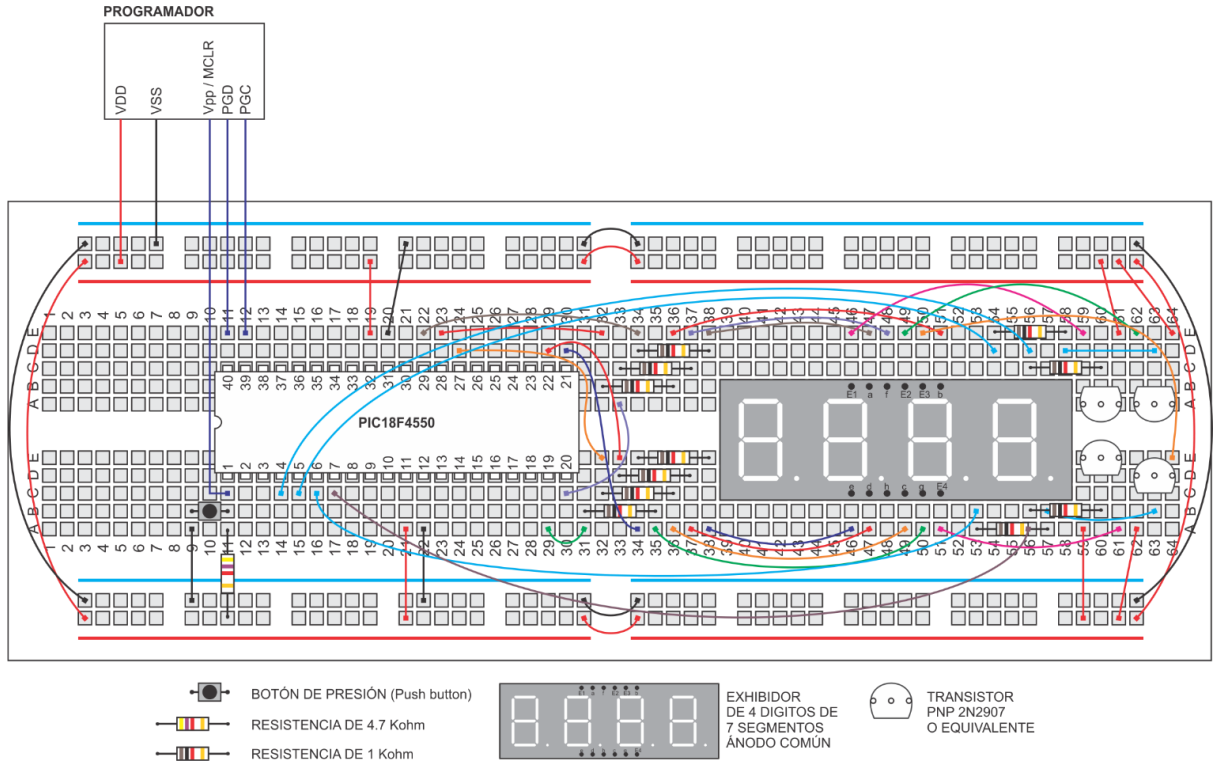


Figura 10. Implementación de 4 exhibidores de 7 segmentos en paralelo.

PROPUESTA DEL ALGORITMO. El Algoritmo 2 propone los pasos necesarios para mostrar valores en los 4 exhibidores de 7 segmentos. El diagrama de flujo correspondiente se muestra en la Figura 11.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 28, pp. 413 - 430.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Algoritmo 2. Barrido de los exhibidores de 7 segmentos.

Paso	*Acción*
1.	*Configuración del microcontrolador. El puerto B maneja los valores para los segmentos. El puerto C maneja la activación de los transistores.*
	Se configuran los puertos C y B como salida.
2.	*Se asigna al arreglo E los valores correspondientes al exhibidor.*
3.	*Se asigna al arreglo B los valores del barrido.*
4.	*Los valores a exhibir se guardan en el arreglo Dig.*
5.	*Se repite este ciclo 4 veces.*
	Inicio del ciclo i
6.	*Se asigna al puerto D el valor de E[Dig$_i$].*
7.	*Se asigna al puerto C el valor de B$_i$.*
8.	*Pausa de 250 ms*
9.	*Se apagan todos los exhibidores*
10.	*Fin del ciclo*
11.	*Ir al paso 5.*

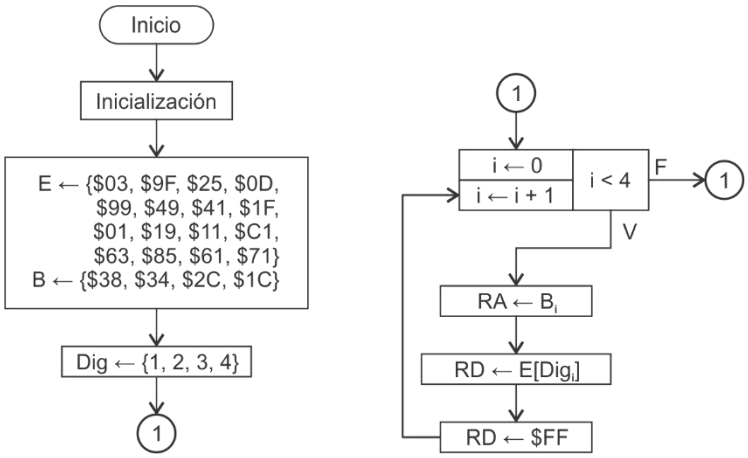


Figura 11. Barrido de los exhibidores de 7 segmentos.

CÓDIGO DEL PROGRAMA. La propuesta del programa se muestra en el Código 2. Es importante mencionar en este punto, que es necesario convencer al estudiante de la importancia que tiene el usar comentarios en el código. Esto permite recordar qué se está haciendo y porqué se usan determinados valores.

Código 2. Programa propuesto para el manejo de 4 exhibidores en paralelo.

```
//Combinación de bits para el barrido, por el puerto A bits 5,4,3,2
//76543210
//xx1110xx  Digito 0   0x38
//xx1101xx  Digito 1   0x34
//xx1011xx  Digito 2   0x2C
//xx0111xx  Digito 3   0x1C

//Combinación de bits para la exhibición de cada digito.
//habc defg          habc defg          habc defg          habc defg
//1000 0001 0 81     1100 1100 4 CC     1000 0000 8 80     1011 0001 C B1
//1100 1111 1 CF     1010 0100 5 A4     1000 1100 9 8C     1100 0010 d C2
//1001 0010 2 92     1010 0000 6 A0     1000 1000 A 88     1011 0000 E B0
//1000 0110 3 86     1000 1111 7 8F     1110 0000 b E0     1011 1000 F B8

void main()
```

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 28, pp. 413 - 430.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

```
{
   //Variable para los valores de cada digito
   int E[16] = { 0x03, 0x9F, 0x25, 0x0D, 0x99, 0x49, 0x41, 0x1F,
                 0x01, 0x19, 0x11, 0xC1, 0x63, 0x85, 0x61, 0x71 };
   int B[4]={0x38, 0x34, 0x2C, 0x1C};   // Variable para el manejo del barrido
   int i;          // Variable auxiliar para el ciclo
   int Dig[4]; //Arreglo que contiene los valores a exhibir

   Dig[0]=0;
   Dig[1]=1;
   Dig[2]=2;
   Dig[3]=3;
   while(TRUE)
   {
      for(i = 0;i < 4; i++)
      {
         RA = B[i];
         RD = E[Dig[i]];
         delayu(10);        //Retardo de 10 microsegundos
         RD = 0xFF;
      }
   }
}
```

La programación modular también representa una buena opción como estrategia de programación, dado que permite al estudiante desarrollar un tipo de librería que se puede llevar a otros proyectos, agilizando de esta manera el desarrollo de una solución. En este caso, el programa de exhibición lo podemos usar de manera repetitiva en otros proyectos, por lo que es recomendable generar una función propia que permita reutilizar en diferentes programas la rutina del manejo de los 4 exhibidores. La figura 12 muestra el diagrama de flujo, usando el control de los exhibidores como una subrutina, y el programa se muestra en el Código 3.

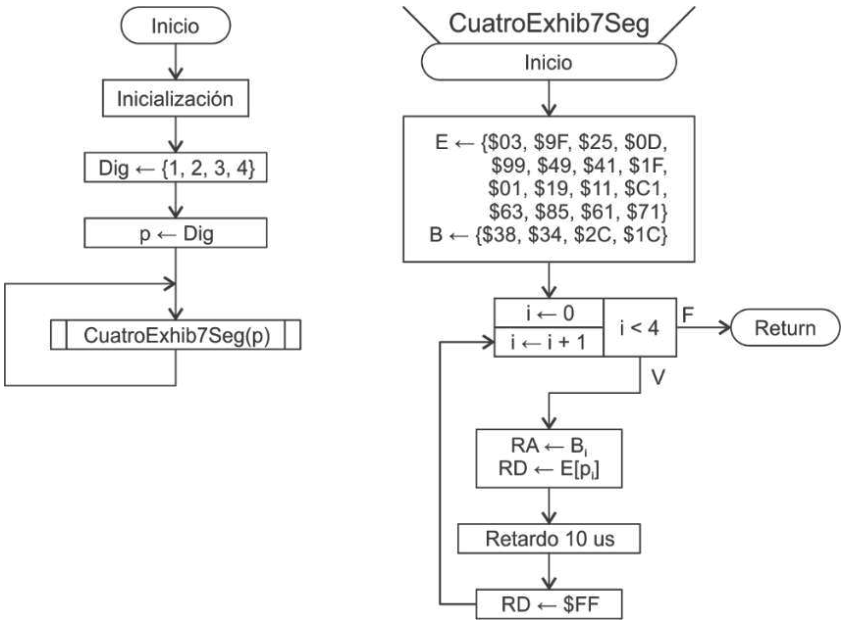


Figura 12. Diagrama de flujo para el control de los exhibidores como subrutina.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 28, pp. 413 - 430.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Código 3. Manejo de 4 exhibidores de 7 segmentos con subrutina.

```
//Combinación de bits para el barrido, por el puerto A bits 5,4,3,2
//76543210
//xx1110xx  Digito 0   0x38
//xx1101xx  Digito 1   0x34
//xx1011xx  Digito 2   0x2C
//xx0111xx  Digito 3   0x1C

//Combinación de bits para la exhibición de cada digito.
//habc defg          habc defg          habc defg         habc defg
//1000 0001 0 81     1100 1100 4 CC     1000 0000 8 80    1011 0001 C B1
//1100 1111 1 CF     1010 0100 5 A4     1000 1100 9 8C    1100 0010 d C2
//1001 0010 2 92     1010 0000 6 A0     1000 1000 A 88    1011 0000 E B0
//1000 0110 3 86     1000 1111 7 8F     1110 0000 b E0    1011 1000 F B8

void CuatroExhib7Seg(int *p)
{
   int B[4]={0x38, 0x34, 0x2C, 0x1C};   // Variable para el manejo del barrido
   int E[16] = {0x03, 0x9F, 0x25, 0x0D, 0x99, 0x49, 0x41, 0x1F,
                0x01, 0x19, 0x11, 0xC1, 0x63, 0x85, 0x61, 0x71};
   int i;   // Variable auxiliar para el ciclo
   for(i = 0;i < 4; i++)
   {
         RA = B[i];
         RD = E[p[i]];
         delayu(10);        //Retardo de 10 microsegundos
         RD = 0xFF;
   }
}

void main()
{
   int *p;
   int Dig[4];

   Dig[0]=1;
   Dig[1]=2;
   Dig[2]=3;
   Dig[3]=4;
   p=Dig;
   while(TRUE)
   {
      CuatroExhib7Seg(p);
   }
}
```

4. Resultados

La parte de mayor importancia es la implementación de los códigos desarrollados. Con este propósito, usamos la tarjeta desarrollada por Ramos [4] en 2021. Este tipo de tarjeta, a diferencia de la gran mayoría de tarjetas de desarrollo, permite usar una gran variedad de microcontroladores, debido a que las terminales no están preconectadas con una finalidad en particular. Por lo tanto, el estudiante debe hacer las conexiones respectivas, por lo que no pierde la experiencia de tener que realizar conexiones de manera correcta. Esta tarjeta se muestra en la Figura 13.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 28, pp. 413 - 430.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

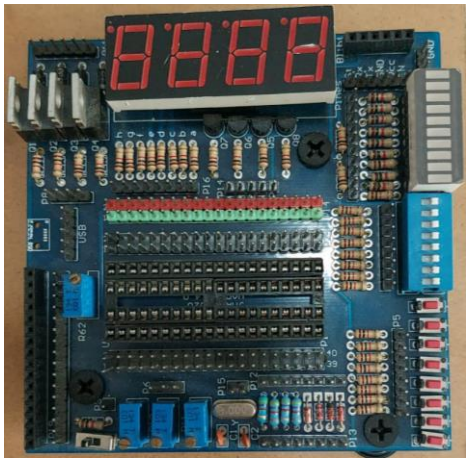


Figura 13. Tarjeta de desarrollo usada [4].

4.1 Caso de estudio 1: Secuencia de luces unidireccional.

Una vez compilado el Código 1, se observa que el espacio requerido en la memoria de programa del microcontrolador es 102 bytes. En la figura 14 se muestra la funcionalidad de este código.

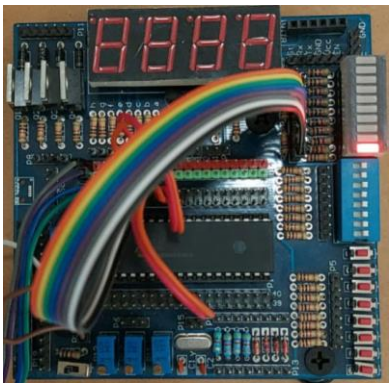


Figura 14. Implementación del corrimiento unidireccional.

Sin embargo, este código no es la única manera en que se puede resolver el problema planteado. En el tiempo que se tiene impartiendo la asignatura, es común que los estudiantes implementan la solución poniendo en 0 y en 1 cada terminal del puerto de manera independiente, como se muestra en el Código 4, donde una vez compilado el programa, el espacio requerido en la memoria del programa es de 502 bytes. Aunque la funcionalidad es la misma, es mucha la diferencia entre un código y otro, por lo que es importante orientar al estudiante para que se dé cuenta que es necesario procurar el ahorro de memoria en el microcontrolador, porque de eso puede depender que un problema pueda ser resuelto o no en un dispositivo en particular.

Código 4. Programa menos eficiente de la secuencia de leds.

```
void main()
{
   while(TRUE)
   {
```

```
      RB0 = 1; RB1 = 0; RB2 = 0; RB3 = 0; RB4 = 0; RB5 = 0; RB6 = 0; RB7 = 0;
      delay(100);
      RB0 = 0; RB1 = 1; RB2 = 0; RB3 = 0; RB4 = 0; RB5 = 0; RB6 = 0; RB7 = 0;
      delay(100);
      RB0 = 0; RB1 = 0; RB2 = 1; RB3 = 0; RB4 = 0; RB5 = 0; RB6 = 0; RB7 = 0;
      delay(100);
      RB0 = 0; RB1 = 0; RB2 = 0; RB3 = 1; RB4 = 0; RB5 = 0; RB6 = 0; RB7 = 0;
      delay(100);
      RB0 = 0; RB1 = 0; RB2 = 0; RB3 = 0; RB4 = 1; RB5 = 0; RB6 = 0; RB7 = 0;
      delay(100);
      RB0 = 0; RB1 = 0; RB2 = 0; RB3 = 0; RB4 = 0; RB5 = 1; RB6 = 0; RB7 = 0;
      delay(100);
      RB0 = 0; RB1 = 0; RB2 = 0; RB3 = 0; RB4 = 0; RB5 = 0; RB6 = 1; RB7 = 0;
      delay(100);
      RB0 = 0; RB1 = 0; RB2 = 0; RB3 = 0; RB4 = 0; RB5 = 0; RB6 = 0; RB7 = 1;
      delay(100);
   }
}
```

Otra alternativa para implementar el corrimiento unidireccional es el Código 5. En este caso, la memoria requerida es 96 bytes, 6 bytes menos que el Código 1. Ambos códigos son muy parecidos en memoria requerida.

Código 5. Segunda opción para corrimiento unidireccional.

```
void main()
{
   int8 C;                    //Se declara la variable C de 8 bits
   tris_b = 0x00;              //Se configura todo el puerto RB como salida
   while(TRUE)
   {
      for(C=1;C!=0;C<<=1)     //C <<= 1 equivale a C = C << 1
      {
         RB = C;           //Se manda escribir al puerto B el valor de C
         delay_ms(100);       //Retardo de 100 ms
      }
   }
}
```

Si el ciclo for es sustituido por un ciclo do – while, como se muestra en el código 8, la memoria requerida es 94 bytes. Por lo tanto, es bueno explorar otras alternativas para lograr una mejor eficiencia de memoria.

Código 6. Usando un ciclo do - while en lugar del ciclo for.

```
   while(TRUE)
   {
      C=1;
      do
      {
         PORTB = C;
         C <<= 1;
         delay_ms(100);
      }
      while (C != 0);
   }
```

4.2 Caso de estudio 2: Exhibición de valores en exhibidores de 7 segmentos.

El resultado de la implementación del Código 2 en el microcontrolador se muestra en la figura. Como se puede observar, se muestran los dígitos del 3 al 0. Para este caso, se requiere de 216 bytes para la implementación.

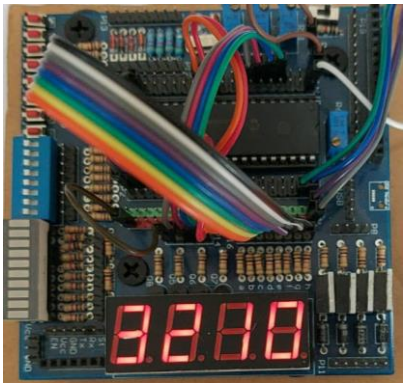


Figura 1. Implementación del corrimiento unidireccional.

Mientras la aplicación sea sencilla, no tenemos muchos problemas con el manejo de la memoria, pero si tuviéramos que implementar una solución más compleja, que involucre a los exhibidores de 7 segmentos, se puede considerar la solución del Código 3, donde el manejo de los 4 exhibidores se hace por medio de una subrutina. En este caso, la memoria necesaria para su implementación en el microcontrolador es de 234 bytes, 16 bytes más, pero es más portátil y se puede llamar varias veces de otras partes del código en general. El convertir una solución en subrutina, tiene la ventaja que se tiene una portabilidad a cualquier otro proyecto.

Cuando se ha impartido la asignatura, algunos estudiantes llegan a preguntar, ¿cuál de los dos códigos es mejor usar? La respuesta la podemos encontrar en el mismo código. Una vez compilado el programa, podemos saber la cantidad de bytes que el programa va a requerir en la memoria del microcontrolador. Es decir, el Código 1 requiere de 98 bytes y el Código 5 requiere de 96 bytes. En este caso, se podría considerar que cualquiera de los dos códigos es una buena opción. Sin embargo, se ha visto que en ocasiones los estudiantes diseñan el programa de manera un poco más compleja como se muestra en el Código 4, y que requiere de 502 bytes para su implementación. Aparentemente es obvio que va a requerir una mayor cantidad de memoria, pero es mejor comprobarlo.

Por lo anterior, es recomendable hacer hincapié a los estudiantes de lo importante que es aprovechar lo mejor posible la memoria, y que se acostumbren a equilibrar el código y la memoria de programa.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una propuesta de metodología para enseñar microcontroladores en el aula, donde los temas que se han mencionado son parte de lo que hemos podido ver en el tiempo que se ha impartido asignaturas que involucran el trabajo con microcontroladores. Generalmente, los estudiantes se preocupan por resolver el problema, pero no se analiza hasta qué punto esa solución es la mejor, o dicho de otra manera, ver si se puede reducir la memoria de programa necesaria para el código desarrollado. Esta metodología puede ser adaptada para la enseñanza de aplicaciones prácticas en la asignatura de Programación Orientada a Objetos.

Consideramos importante que el estudiante genere la habilidad de analizar el código para mejorar el desempeño del microcontrolador, pues si en algún momento debe resolver un problema, pero solamente cuenta con un dispositivo específico, es necesario procurar que el código pueda correr ahí.

Como trabajo a futuro, tenemos el realizar comparaciones en el desempeño, entre diferentes fabricantes de microcontrolador, para conocer las ventajas y desventajas de ellos. De esta manera, se pueden tomar mejores decisiones en el desarrollo de un proyecto, especialmente si tenemos la ventaja de poder decidir qué dispositivo usar.

Referencias

[1] Fleisher A. "*10 principales tendencias en microcontroladores para 2024*", Octopart. https://octopart.com/es/pulse/p/10-top-trends-microcontrollers-2024. Consultado el 13 de septiembre del 2024.
[2] Sanchez, N. B. M., Paguay, G. P. L., & Celeiro, R. A. M. D. O. "*Integración de la Inteligencia Artificial en la Enseñanza Técnica y Tecnológica: Aportes y Desafíos en la Asignatura de Microcontroladores*", *Revista de Investigación Científica TSE DE*, *7*. 2024.
[3] Vásquez P. C. A., & León Martillo, D. Á. "*Diseño e implementación de los módulos didácticos complementarios para entrenamiento de microcontroladores de la familia PIC18F4550*", Bachelor's thesis.
[4] Ramos J. U. A., Ramos A. J. M. , P. O. J. C., Aceves F. M. A. "*Desarrollo de Hardware para el Aprendizaje del Manejo de Microcontroladores*", Proyectando Innovaciones en Ingeniería, Capítulo 8, pp. 111 – 124. ISBN: 978-607-9394-24-0, 2021.
[5] Apaza Condori, David. "Microcontroladores PIC fundamentos y aplicaciones un enfoque didáctico." (2017).
[6] Juan Pérez, María López, "*A Comparative Study of Microcontroller Programming Platforms: MPLAB X IDE vs. Arduino IDE*", Revista de Ingeniería Electrónica, Vol. 12, No. 3, 2020
[7] Barrett, Steven F., and Daniel J. Pack. Microchip AVR® Microcontroller Primer: Programming and Interfacing. Morgan & Claypool Publishers, 2019.
[8] Breijo, Eduardo García. Compilador C CCS y simulador PROTEUS para microcontroladores PIC. Marcombo, 2012.
[9] Carrillo, Marisela Vital. "Introducción de Arduino." Vida Científica Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 4 9.17 (2021): 4-8.
[10] Dunbar, Norman, and Norman Dunbar. "Alternatives to the Arduino IDE." Arduino Software Internals: A Complete Guide to How Your Arduino Language and Hardware Work Together (2020): 273-340.
[11] Valvano[1], Jonathan W., Ramesh Yerraballi[1], and Chad J. Fulton. "Teaching embedded systems in a MOOC format." (2016).
[12] Marciniak, Tomasz, Kacper Podbucki, and Jakub Suder. "Application of the Nucleo STM32 module in teaching microprocessor techniques in automatic control." Przeglad Elektrotechniczny 98.10 (2022).
[13] Family, MSP430 Microcontroller. "MSP430 IAR Embedded Workbench® IDE." (1996).
[14] Studio, Code Composer. "Getting Started Guide." Texas Instruments: Dallas, TX, USA (2006).
[15] Microchip Technology Inc. "*PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet: 28/40/44-Pin, High-Performance, Enhanced Flash, USB Microcontrollers (DS39632E)*". 2018. Recuperado de https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 29, pp. 431 - 442.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Seguimiento Visual de Objetos Utilizando Algoritmos Basados en Filtros de Correlación

Hernández Hernández Beatriz, Rosales Silva Alberto Jorge y Sánchez Ramírez Edwards Ernesto

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
bhernandezh2302@alumno.ipn.mx

Resumen

El seguimiento visual de objetos ha sido ampliamente utilizado en las últimas décadas para relizar diferentes tareas como vigilancia, navegación visual, navegación autónoma, así como su aplicación en otras áreas de trabajo. En la actualidad el uso de algoritmos basados en filtros de correlación ha incrementado su popularidad debido a la capacidad de mejorar la robustez y eficiencia en el segumiento de objetos, comparados con diferentes algoritmos del estado del arte, esto debido a que su procesamiento es llevado a cabo en el dominio de Fourier. El primer algoritmo en utilzar estas técnicas es el filtro MOSSE y en el presente trabajo se realiza una descripción general del mismo así como de sus ecuaciones, además de su simulación utilizando el entorno de MATLAB mostrando sus resultados. A pesar del buen desempeño del filtro, aún hay muchos retos a los que se tiene que enfrentar, como el seguimiento a largo plazo aun cuando el objeto presente oclusión o se pierda durante su trayectoria.

Palabras clave: Visión por computadora, filtros de correlación, procesamiento de imágenes, filtro MOSSE, seguimiento de objetos.

1. Introducción

Actualmente, el seguimiento visual de objetos es una de las áreas fundamentales de investigación en el campo de la visión por computadora, ya que debido a que combina diferentes técnicas como el procesamiento de imágenes, reconocimiento de patrones, inteligencia artificial, matemáticas [1], entre otras, éste puede ser aplicado en diferentes tareas como vigilancia, robótica, interacción hombre-máquina, navegación autónoma y realidad aumentada.

Los algoritmos de seguimiento de objetos llevan a cabo dos tareas importantes, la primera consiste en utilizar técnicas de detección y clasificación que permitan obtener una posición confiable del objeto y la segunda en lograr estimar una posición precisa del objeto.

El propósito principal del seguimiento visual de objetos es localizar la posición de un objeto en una imagen dada la información del objeto en la imagen anterior [2]. Usualmente esto se formula como una tarea de búsqueda en la que un modelo de apariencia es utilizado para representar al objeto y posteriormente una estrategia de búsqueda es implementada para predecir el estado del objeto en la imagen siguiente [3], con el fin de seguir el movimiento del objeto a través de una secuencia de imágenes en un video y al mismo tiempo extraer información que será de utilidad para las imágenes posteriores.

Aunque la tarea del seguimiento visual de objetos ha sido ampliamente abordada por un largo tiempo, aún se tienen que resolver o mejorar algunos retos como la oclusión, el cambio de apariencia, fondo desordenado, cambio en el tamaño del objeto, variaciones de iluminación, ruido en la imagen,

objetos similares, asi como movimientos complejos del objeto, tal como lo indica Ahmad A. y otros en [4].

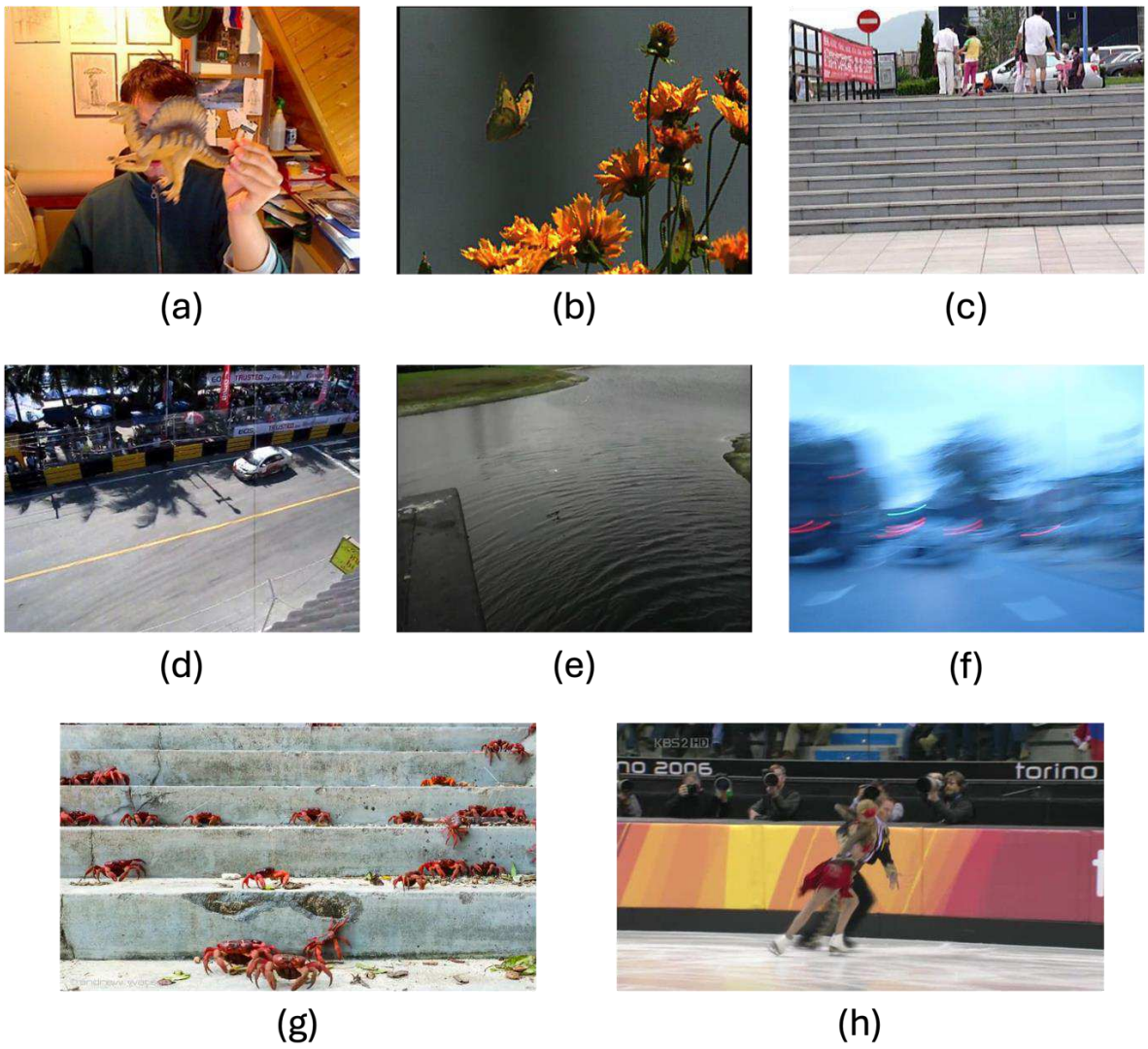


Figura 1. Retos que se pueden presentar durante el seguimiento de objetos. (a) Oclusión, (b) cambio de apariencia, (c) fondo desordenado, (d) cambio en el tamaño del objeto, (e) variaciones de iluminación, (f) ruido en la imagen, (g) objetos similares, (h) movimientos complejos del objeto.

En [5], Zhongming y otros categorizan a los algoritmos de seguimiento visual de objetos en algortimos basados en modelos generativos o en algoritmos basados en modelos discriminativos. Los algoritmos generativos son los mas comunes y utilizan los resultados históricos de las imágenes anteriores para generar modelos estadísticos que describan las características del objeto a seguir. Pueden gestionar de forma eficaz la pérdida de objetos durante el seguimiento, sin embargo, debido a que los métodos basados en modelos generativos normalmente ignoran la información de fondo que rodea al objeto, pueden llegar a perderlo fácilmente; dentro de este tipo de algoritmos se encuentran el filtro de partículas, el filtro Kalman y los algoritmos de flujo óptico.

A diferencia de los algoritmos basados en modelos generativos, los algoritmos basados en modelos discriminativos aprenden un límite de decisión que le permite distinguir entre la región

correspondiente al objeto y la región correspondiente al fondo; los algoritmos que tienen como base filtros de correlación utilizan este tipo de modelos discriminativos.

En las últimas décadas, se han propuesto diferentes métodos y técnicas en el área del seguimiento visual de objetos, sin embargo los algoritmos que tienen como base el uso de filtros de correlación han mostrado una mejor velocidad de procesamiento así como un desempeño robusto [6].

Tomando en cuenta lo anterior, en [7] M. Fiaz y otros clasifican a los algoritmos de seguimiento visual de objetos en dos importantes categorías: los que utilizan Filtros de Correlación (CFT, Correlation Filter Trackers) y los que no (NCFT, Non-CFT). Los CFT son métodos discriminativos y se ha comprobado que son capaces de tener un mejor desempeño comparados con los NCFT, debido a su eficiencia computacional y su respuesta en tiempo real, ya que los cálculos se realizan en el dominio de la frecuencia. Los filtros de correlación por si solos sirven como señal de referencia para posteriormente ser comparada, en el dominio de la frecuencia, con una señal de prueba y con ello poder determinar el grado de similitud entre ellas.

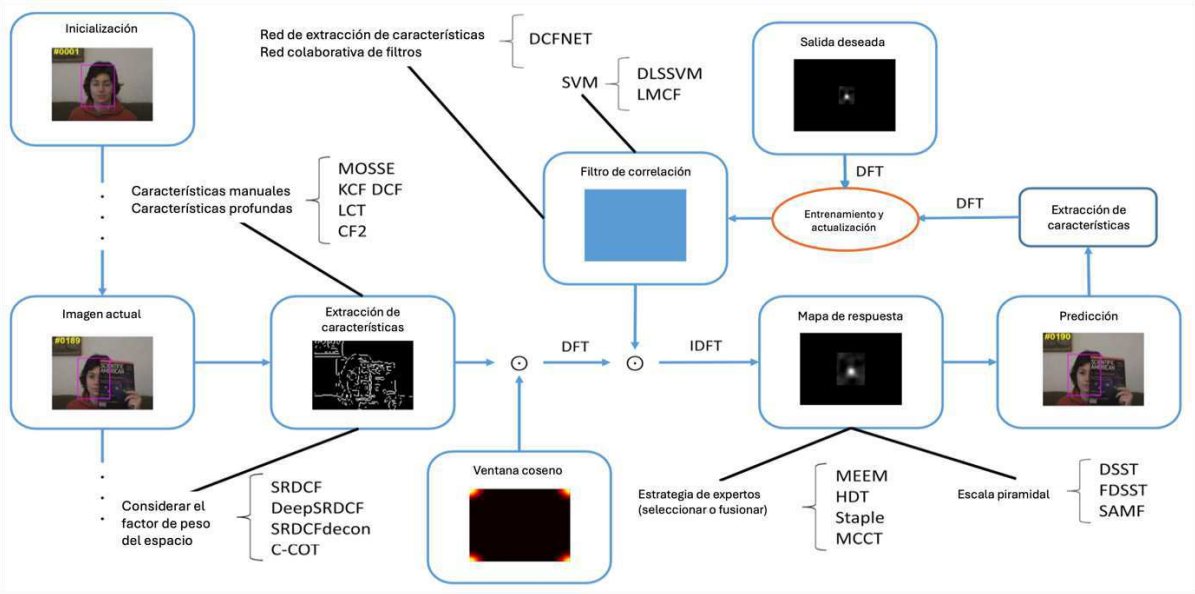


Figura 2. Estructura general de algoritmos de seguimiento basados en filtros de correlación propuesta por Du y Wang en [8].

Du y Wang presentan en [8] una descripción y comparativa de diferentes algoritmos basados en filtros de correlación combinados con otros métodos así como su evaluación utilizando conjuntos de datos de la literatura. En la figura 2 se observa una estructura con los algoritmos descritos y comparados, cuyos resultados muestran que aunque las técnicas que involucran aprendizaje profundo proporcionan buenos resultados, las técnicas tradicionales que se basan en filtros de correlación aún deben continuar siendo investigadas.

Liu et al. también presentan en [9] una descripción general de algoritmos que utilizan filtros de correlación para realizar seguimiento de objetos, además de los bases de datos utilizadas para evaluarlos, los cuales se muestran en la figura 3 y son las más utilizados en algoritmos de seguimiento.

Los seguidores de objetos basados en filtros de correlación utilizan la técnica de *matching template* para encontrar la similitud entre una plantilla y una imagen. Esta similitud se calcula con un producto punto que compara los pixeles entre una plantilla y una imagen deseada y se representa con la ecuación 1, donde x es la plantilla y y es la imagen.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 29, pp. 431 - 442.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

$$F(x,y) = x \cdot y = \sum_i x_i y_i \tag{1}$$

El resultado del producto punto de dos imágenes similares corresponde a un valor alto comparado con el resultado que se obtiene del producto punto de dos imágenes complatamente diferentes. A partir de estos resultados, se puede definir un valor de umbral que permita encontrar un objeto en una imagen.

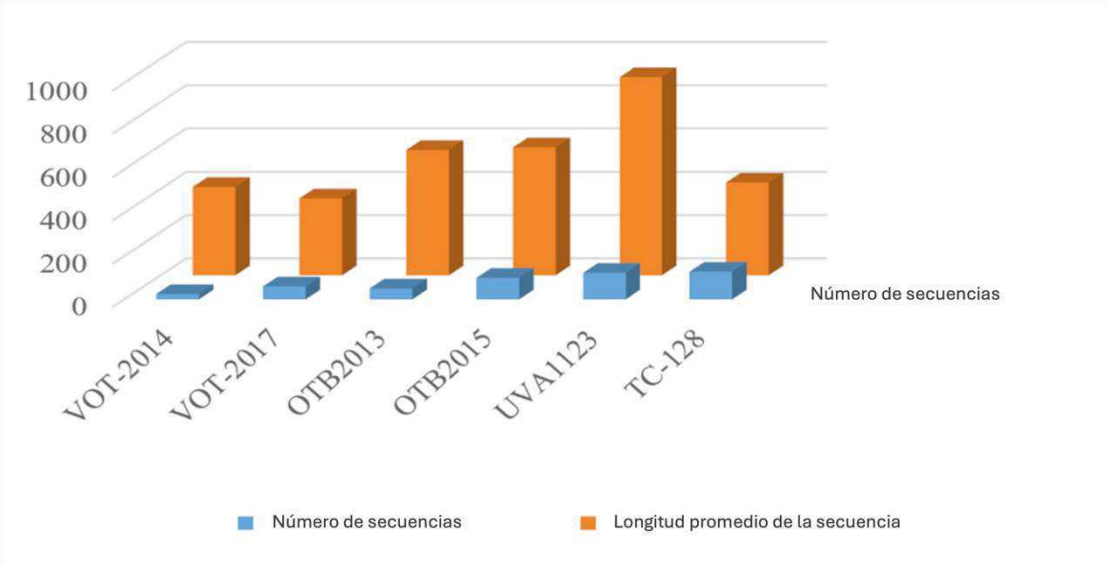


Figura 3. Base de datos de la literatura mas utilizadas en seguimiento de objetos según Liu et al.

La idea fundamental del *matching templat* es sencilla: la plantilla a encontrar en la imagen se mueve sobre todos los pixeles de la imagen como si fuera un filtro lineal y se mide la semejanza entre la plantilla y los correspondientes pixeles de la imagen que abarca. Evidentemente la determinación de semejanza entre el patrón y cada uno de los puntos de la imagen no es sencilla, ya que debe considerarse que esta medida de semejanza sea confiable en casos tales como que el patrón se encuentra en la imagen escalado, rotado o distorsionado.

En [10] se hace una descripción de las diferentes técnicas para obtener la medida de semejanza entre una plantilla y una imagen, sin embargo definen que el uso de los coeficentes de correlación presenta mejores resultados. Las diferentes técnicas descritas se muestran en la figura 4. Así mismo, este proceso genera un pico de correlación en el objeto de interés, descartando alguna respuesta para el fondo.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 29, pp. 431 - 442.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

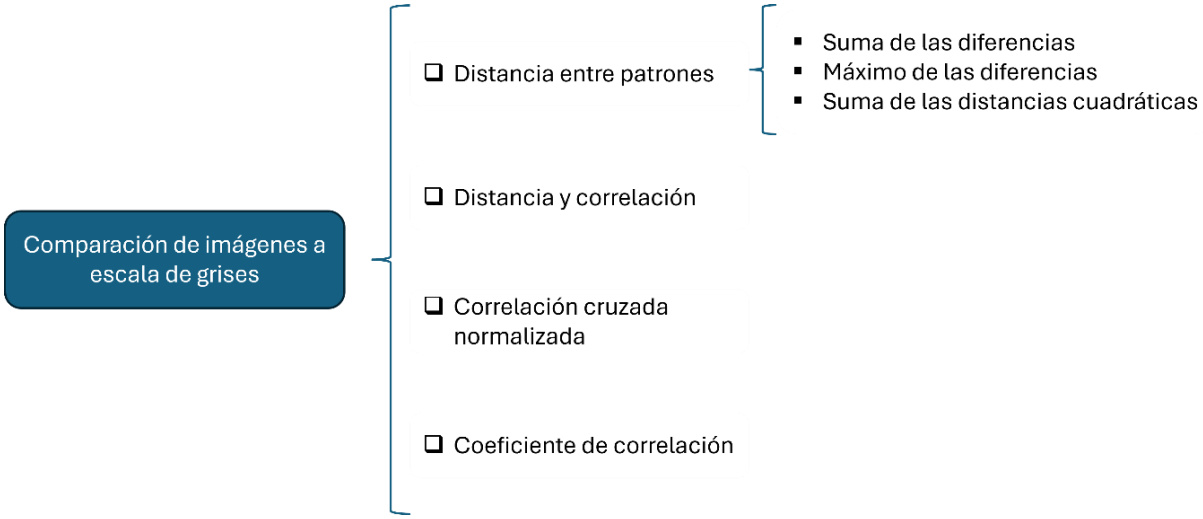


Figura 4. Técnicas para obtener la semejanza entre una plantilla y una imagen.

Con el objetivo de medir la fuerza del pico de correlación se utiliza el PSR (del inglés, *Peak to Sidelobe Ratio*) y este puede ser utilizado para detectar oclusion o fallas en el seguimiento. Para calcular el PSR la salida de correlación g es dividida entre el pico, el cual es el máximo valor, y los lóbulos laterales, los cuáles corresponden al resto de los pixeles, excluyendo una ventana alrededor del pico. El PSR se define como:

$$PSR = \frac{g_{max} - \mu_{s1}}{\sigma_{s1}} \tag{2}$$

Dónde g_{max} es el valor del máximo pico de correlación y μ_{s1} y σ_{s1} corresponden a la media y a la desviación estándar de los lóbulos laterales, respectivamente. Cuando el objeto seguido de imagen actual coincide con el objeto a seguir de forma correcta, solo se mostrará un pico en el mapa de respuesta.

La correlación se calcula en el dominio de Fourier con el fin de evitar la operación de convolución que requiere de mucho tiempo y costo computacional y es por ello que los algoritmos que se basan en filtros de correlación están siendo considerablemente atractivos en el área de seguimiento visual de objetos.

Aunque actualmente existen muchos métodos de seguimiento de objetos que utilizan filtros de correlación, el primero que utilizó esta técnica fue el filtro MOSSE, el cual es uno de los seguidores de objetos mas populares y en este trabajo se presenta una revisión de éste así como su implementación utilizando el entorno de Matlab. El algoritmo implementado fue probado con la base de datos OTB2015, la cual es utlizada para evaluar algoritmos de seguimiento visual de objetos y esta compuesta por 100 secuencias de video.

En las siguientes secciones del presente artículo se hace una descripción del filtro MOSSE y de sus ecuaciones principales, después se muestran los pasos necesarios para llevar acabo su simulación implementada en Matlab, posteriormente se tienen los resultados obtenidos y finalmente se presentan las conclusiones.

2. El filtro MOSSE

El filtro MOSSE (del inglés *Minimum Output Sum of Squared Error*) fue propuesto por Bolme en [10] y fue utilizado por primera vez en el seguimiento de objetos en 2010. Este filtro es el primer seguidor de objetos que tiene como base a los filtros de correlación logrando un buen desempeño ya que utiliza

la FFT (del inglés *Fast Fourier Transform*) para llevar a cabo los cálculos en el dominio de Fourier, siendo un filtro estable que puede ser inicializado con una sola imagen de un video.

Este filtro puede ser considerado como una versión kernelizada de un filtro de correlación lineal y forma las bases de los seguidores de objetos más rápidos que se conocen en la actualidad, además de presentar una respuesta robusta a los cambios de apariencia de un objeto y efectuar una mejor discriminación entre los objetos y el fondo.

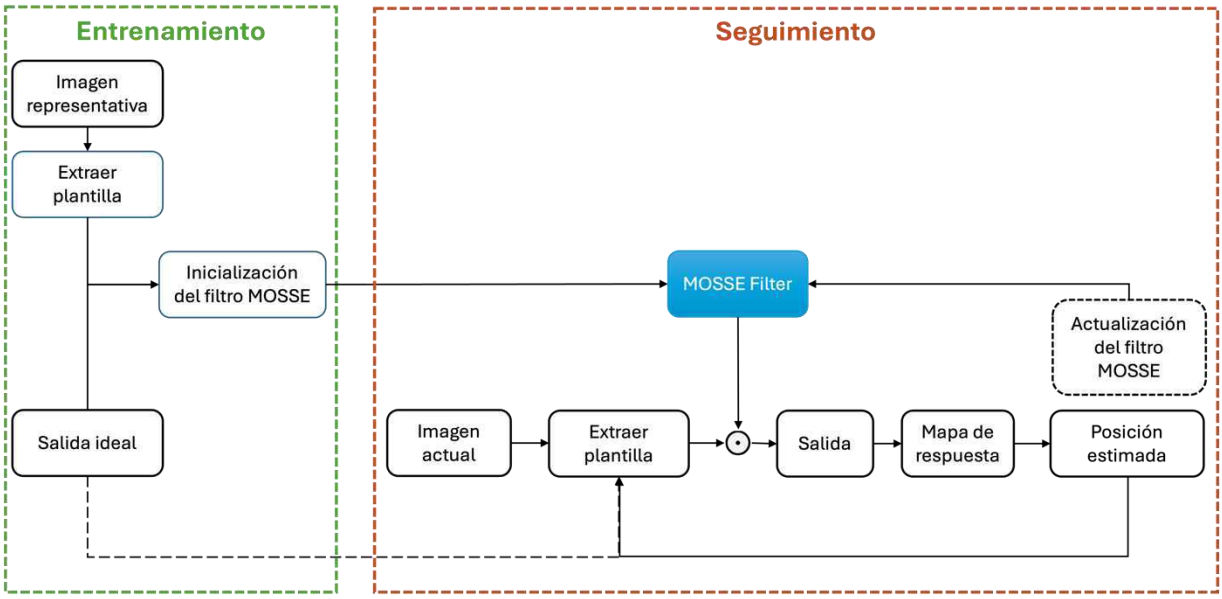


Figura 5. Diagrama general del filtro MOSSE.

En la figura 5 se muestra un diagrama general del algoritmo del filtro MOSSE, el cual tiene dos componentes principales: entrenamiento y seguimiento. La etapa de entrenamiento consiste esencialmente en configurar el filtro MOSSE para que reconozca y se correlacione con la apariencia del objeto a seguir. El filtro se entrena para producir una respuesta que se correlacione al máximo con la salida deseada en el dominio de la frecuencia. Una vez que se completa el entrenamiento, el filtro MOSSE está listo para la etapa de seguimiento, donde se aplica a las imágenes posteriores de la secuencia de vídeo para seguir al objeto en tiempo real.

Una de las tareas a realizar durante la etapa de entrenamiento es la inicialización del filtro y para ello es necesario seleccionar al objeto utilizando las primeras imágenes de la secuencia de video, recortarlo y centrarlo. Posteriormente el filtro inicializado se correlaciona con una ventana de seguimiento en el video para poder encontrar la nueva ubicación del objeto. Esta inicialización se lleva a cabo de forma manual o aplicando algún algoritmo de detección de objetos para obtener su centro y dibujando un cuadro delimitador. Durante la inicialización, el cuadro delimitador del objeto representa a la plantilla y durante el seguimiento representa a la ventana de búsqueda.

A continuación, se presentan las ecuaciones para obtener el filtro de correlación de una imagen, donde F_i es la imagen de entrada y G_i es la correlación de salida, ambas calculadas en el dominio de la frecuencia:

$$H_i^* = \frac{G_i}{F_i} \tag{3}$$

Para encontrar un filtro que asigne las entradas de entrenamiento a las salidas de entrenamiento deseadas, se implementa el filtro MOSSE, cuyo objetivo es minimizar la suma del error al cuadrado

entre la salida deseada y la salida actual en el dominio de Fourier, por lo que la minimización toma la forma:

$$\min H^* \sum_i |F_i \odot H^* - G_i|^2 \tag{4}$$

Al resolver esta ecuación de optimización para H^*, se obtiene una expresión en forma cerrada para el filtro MOSSE. El numerador es la correlación entre la entrada y la salida deseada, y el denominador es el espectro de energía de la entrada. ∈ es un parámetro de regularización que se puede utilizar para corregir frecuencias de baja energía y producir un filtro más estable.

$$H_i^* = \frac{G_i \odot F_i^*}{F_i \odot F_i^* + \in} \tag{5}$$

Para obtener un filtro que presente una salida ideal, es necesario crear un objeto sintético que produzca un pico máximo de correlación en la posición deseada y valores más pequeños en otras partes de la salida de correlación. La salida sintética de la ith imagen f_i se construye como una imagen bidimensional en forma de Gauss centrada en el punto objetivo (x_i, y_i), donde σ es la desviación estándar de la función [8], y se convierte al dominio de Fourier utilizando la FFT.

$$g_i = e^{-\left(\left((x-x_i)^2+(y-y_i)^2\right)/\sigma^2\right)}, i = 1, \dots, n \tag{6}$$

Las ecuaciones anteriores se aplican durante la etapa de entrenamiento del filtro, sin embargo, durante el seguimiento del objeto este puede presentar cambios en su apariencia, por lo que se requiere actualizar el filtro en línea para continuar con el seguimiento. Para ello es necesario utilizar las siguientes ecuaciones, donde η es la tasa de aprendizaje. Esto les da más peso a las imágenes recientes y permite que el efecto de las imágenes anteriores decaiga exponencialmente con el tiempo.

$$H_i^* = \frac{A_i}{B_i} \tag{7}$$

$$A_i = \eta G_i \odot F_i^* + (1-\eta) A_{i-1} \tag{8}$$

$$B_i = \eta F_i \odot F_i^* + (1-\eta) B_{i-1} \tag{9}$$

3. Simulación

La simulación del filtro MOSSE se llevó a cabo bajo el entorno de MATLAB y se evaluó utilizando la base de datos OTB2015, desarrollándose las etapas indicadas en la sección anterior. La base de datos OTB2015 es una versión extendida de la base de datos OTB2013 y está integrada por 100 secuencias de video, su información se obtiene manualmente y su índice de evaluación utiliza tanto la precisión como la tasa de éxito para evaluar el desempeño del seguidor de objetos.

Para lograr lo anterior primero fue necesario que durante las etapas de entrenamiento y seguimiento se realizaran algunos pasos de preprocesamiento de las imágenes que se indican en la figura 6.

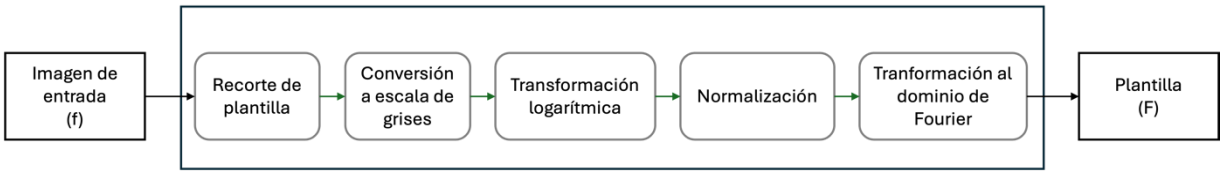


Figura 6. Etapas para el preprocesamiento de imágenes.

Primero, a partir de una imagen de entrada se recorta una plantilla que se convierte a escala de grises para que se puedan realizar las operaciones correspondientes, ya que el espacio de escala de grises es bidimensional. Después se lleva a cabo una transformación logarítmica aplicando la ecuación 10, donde x y y son los valores de los pixeles de la imagen de salida y entrada, respectivamente.

$$x = \ln(y + 1) \tag{10}$$

Esta función logarítmica se aplica para reducir los efectos de iluminación y mejorar el contraste, lo que hace que las funciones de alto contraste estén disponibles para que el filtro se inicialice.

Los valores de píxeles de la plantilla del paso anterior se normalizan para obtener una media de cero y una normal de uno. La normalización ayuda a reducir los efectos del cambio de iluminación y a mantener una coherencia en la iluminación entre los distintos fotogramas del vídeo.

Posteriormente, la plantilla se convierte del dominio espacial al dominio de Fourier. La transformada de Fourier se utiliza para descomponer una señal en sus componentes seno y coseno. Una imagen no es una señal analógica, por lo tanto, se utiliza la transformada discreta de Fourier (del inglés *Discrete Fourier Transform*) para una imagen. La salida de esta transformación representa la imagen en el dominio de Fourier o de frecuencia.

Como se observa en la figura 3 la etapa de preprocesamiento de las imágenes toma como entrada una imagen en el dominio espacial y retorna una imagen en el dominio de la frecuencia.

En la figura 7 se presenta el procedimiento utilizado para implementar el algoritmo MOSSE en el presente trabajo, donde se utilizó un conjunto de 375 imágenes pertenecientes a la base de datos OTB2015, una desviación estándar σ de 20 píxeles, un valor de tasa de aprendizaje η de 0.095 y un parámetro de regularización $\in$ de 0.001.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 29, pp. 431 - 442.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Etapa de entrenamiento para i muestras de entrenamiento:

- Preprocesamiento de la imagen

$$F_i = fft(preprocess(f_i))$$

- Creación de un objeto sintético en el dominio Fourier

$$g_i = e^{-\left(\left((x-x_i)^2+(y-y_i)^2\right)/\sigma^2\right)}$$

$$G_i = fft(g_i)$$

- Actualización del filtro

$$H_i^* = \frac{G_i \odot F_i^*}{F_i \odot F_i^* + \epsilon}$$

Etapa de seguimiento para i imágenes:

- Preprocesamiento de la imagen (recortar a partir de la posición estimada)

$$F_i = fft(preprocess(f_i))$$

- Cálculo del Mapa de respuesta de la correlación

$$g_i = fft^{-1}(H_i^* * F_i)$$

- Estimación de la posición del objeto con el pico del mapa de respuesta de la correlación

$$pos_e = maxVal(g_i)$$

- Actualización del filtro con las siguientes ecuaciones:

$$H_i^* = \frac{A_i}{B_i}$$

$$A_i = \eta G_i \odot F_i^* + (1-\eta)A_{i-1}$$

$$B_i = \eta F_i \odot F_i^* + (1-\eta)B_{i-1}$$

Figura 7. Procedimiento para implementar el algoritmo del filtro MOSSE.

Durante la **etapa de entrenamiento** se implementaron tres pasos importantes para obtener un filtro que presente una respuesta confiable. Primero, se recortó una plantilla de la primera imagen del vídeo a utilizar para llevar a cabo el seguimiento del objeto, haciendo coincidir el centro del objeto con el centro de la plantilla y se llevó a cabo su preprocesamiento como se indica en la figura 6. Después fue necesario crear un objeto sintético en el dominio de la frecuencia que representara la ubicación del centro del objeto en el centro de la imagen de forma ideal, como se puede ver en la figura 8, y finalmente el filtro MOSSE fue inicializado. Cabe mencionar que estos pasos de la etapa de entrenamiento se pueden realizar con una sola imagen o con un conjunto de imágenes que lograrán un seguimiento mas eficiente y continuo.

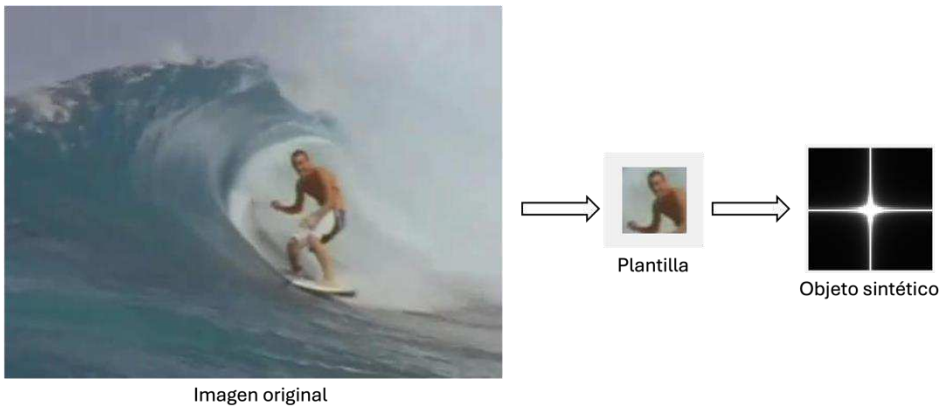


Figura 8. Fotograma inicial del vídeo, plantilla y objeto sintético.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 29, pp. 431 - 442.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Para la **etapa de seguimiento** fueron necesarios cuatro pasos importantes. El primero fue el preprocesamiento de la imagen que se obtuvo de recortar la imagen actual del video a partir de la posición estimada con la imagen anterior. Después se obtuvo el mapa de respuesta de la correlación entre la plantilla y la imagen actual como se puede observar en la figura 9, posteriormente, a partir del pico máximo del mapa de respuesta de la correlación se calculó la posición estimada del objeto en pixeles. Finalmente se actualiza el filtro para que los valores obtenidos puedan ser utilizados en la estimación de la posición del objeto en la siguiente imagen.

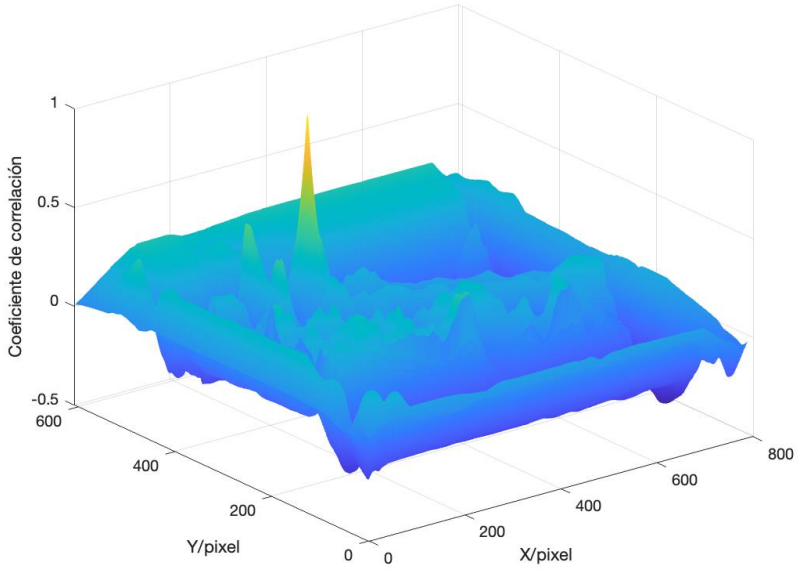


Figura 9. Mapa de respuesta de la correlación entre la plantilla y la imagen.

Aplicando el filtro MOSSE creado con un objeto de forma sintética a la plantilla seleccionada, y transformándolo del dominio de frecuencia al dominio espacial con la transformada inversa de Fourier, se obtiene una salida ideal, como se muestra en la figura 10.

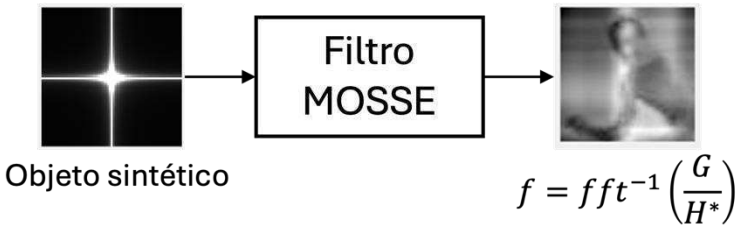


Figura 10. Aplicación del filtro MOSSE para una salida ideal.

4. Resultados

Los resultados de la simulación del filtro MOSSE se obtienen a partir de la implementación de la etapa de seguimiento. En dicha etapa el objeto se mantiene en seguimiento mientras permanezca dentro de la ventana determinada por la plantilla seleccionada. La figura 11 muestra diferentes imágenes de la respuesta del filtro MOSSE realizando el seguimiento de un objeto.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 29, pp. 431 - 442.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

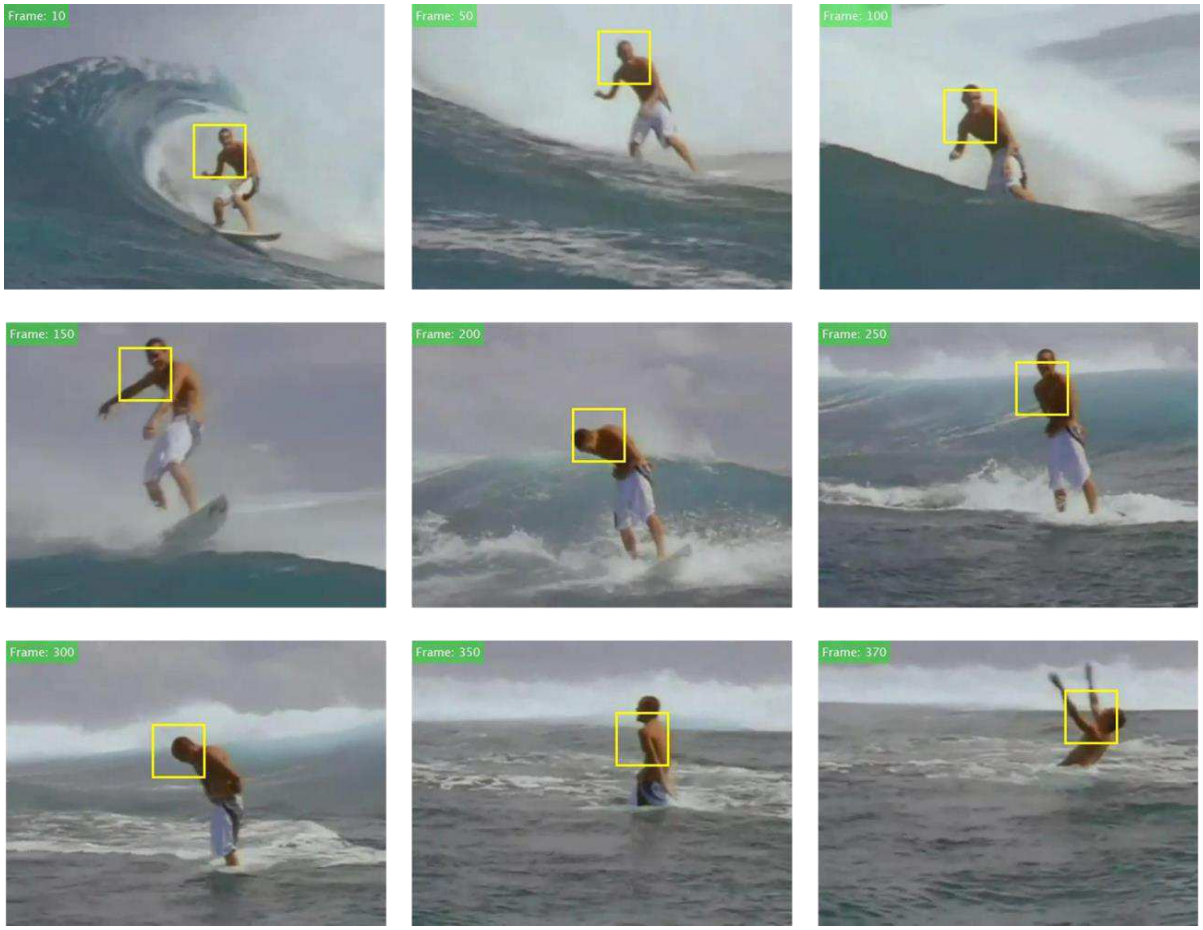


Figura 11. Seguimiento de un objeto utilizando el filtro MOSSE.

5. Conclusiones

En este trabajo se presenta y simula en MATLAB el algoritmo del filtro MOSSE para el seguimiento de un objeto, logrando un buen desempeño cuando se evalúa utilizando la base de datos OTB2015. Este algoritmo puede tomar las ventajas de utilizar el filtro de correlación debido a que trabaja en el dominio de Fourier y se ocupa de diferentes cambios en la apariencia de los objetos.

Aunque el filtro MOSSE puede abordar algunos desafíos y tiene una respuesta aceptable, sigue siendo un algoritmo débil ya que no puede adaptarse a una oclusión o a una pérdida del objeto así como a una variación de tamaño del mismo. Es por eso que en el trabajo futuro nos centraremos en comparar este filtro con otros recientes en la literatura, así como en la implementación de un nuevo algoritmo que permita fusionar diferentes técnicas para obtener mejores resultados.

Agradecimientos. Los autores de este trabajo reconocen las valiosas contribuciones realizadas por el Instituto Politécnico Nacional de México y el CONAHCYT de México.

Referencias

[1] J. Zhang, W. Feng, T. Yuan, J. Wang, y A. K. Sangaiah, "*SCSTCF: Spatial-Channel Selection and Temporal Regularized Correlation Filters for visual tracking*", *Appl Soft Comput*, vol. 118, Mar. 2022.

[2] D. Yuan, W. Kang, and Z. He, "*Robust visual tracking with correlation filters and metric learning*", *Elsevier*, vol. 195, 2020.

[3] J. Dou, Q. Qin, y Z. Tu, "*Robust visual tracking based on generative and discriminative model collaboration*", *Multimed Tools Appl*, vol. 76, no. 14, pp. 15839–15866, Jul. 2017.

[4] A. Ali, A. Jalil, J. Niu, X. Zhao, S. Rathore, J. Ahmed, M. Aksam, "*Visual object tracking – classical and contemporary approaches*", *Front. Comput. Sci.,* Springer, vol. 10, pp. 167-188, 2016.

[5] L. Zhongming y I. Azlan. "*Performance of Correlational Filtering and Deep Learning Based Single Target Tracking Algorithms", Journal of Smart Science and Technology*. vol. 3, pp. 63-79, 2023.

[6] S. Liu, T. Zhang, X. Cao, y C. Xu, "*Structural Correlation Filter for Robust Visual Tracking*", *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE Computer Society, pp. 4312–4320, Dec. 2016.

[7] M. Fiaz, A. Mahmood, S. Javed y S. K. Jung, «Handcrafted and Deep Trackers: Recent Visual Object Tracking,» *ACM Comput. Surv,* pp. 1-37, 2019.

[8] S. Du y S. Wang, "*An Overview of Correlation-Filter-Based Object Tracking*", *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 18–31, Feb. 2022.

[9] S. Liu, D. Liu, G. Srivastava, D. Polap, y M. Woźniak, "*Overview and methods of correlation filter algorithms in object tracking*", *Complex and Intelligent Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 1895–1917, Aug. 2021.

[10] E. Cuevas, D. Saldívar y M. Pérez, "*Procesamiento Digital de Imágenes usando MatLAB & Simulink",* Alfaomega Grupo Editor, México, Primera edición, Trigésima segunda reimpresión, 2016.

[11] D. S. Bolme, J. R. Beveridge, B. A. Draper, y Y. M. Lui, "*Visual object tracking using adaptive correlation filters*", *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 2544–2550, 2010.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 30, pp. 443 - 454.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Fusión de Sensores para Sistemas de Navegación Inercial Utilizando un Filtro Kalman Federado en Tiempo Real

Edwards Ernesto Sánchez Ramírez[1], Alberto Jorge Rosales Silva[2] y Jorge Cerezo Sánchez[2].

[1] Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco
esanchezr1604@alumno.ipn.mx, arosaless@ipn.mx.
[2] Universidad Tecnológica de Puebla
jorge.cerezo@utpuebla.edu.mx

Resumen

Los sistemas de medición inercial se han utilizado en las últimas décadas para medir la orientación de vehículos, estabilizar plataformas y reconstruir entornos tridimensionales. Para mejorar la precisión, se han desarrollado varias estrategias de fusión de sensores que incluyen técnicas bayesianas, filtrado Kalman y redes neuronales convolucionales. En este trabajo, presentamos un filtro Kalman federado rápido en tiempo real para aplicaciones en sistemas de navegación inercial, el cual fue comparado con otro algoritmo del estado del arte. Presentamos resultados de simulación en el entorno Matlab/Simulink y la implementación del algoritmo C++ con evaluación de desempeño. También presentamos los primeros resultados experimentales obtenidos.

Palabras clave: Sistemas-descentralizados, sistemas-embebidos, filtro-Kalman-federado, fusión-de-sensores, sistemas-de-navegación inercial.

1. Introducción

Los sistemas de navegación electrónica se han desarrollado para proporcionar mediciones precisas como la posición global, la orientación del vehículo y la estimación de la postura. Estos dispositivos se denominan IMU (unidad de medición inercial), AHRS (sistema de referencia de actitud y rumbo) e INS (sistema de navegación inercial), dependiendo de las capacidades del conjunto de sensores.

El INS es el más completo e incluye una unidad de medición inercial, una antena GNSS (sistema global de navegación por satélite) y sensores complementarios. Sin embargo, estos sensores presentan varios problemas, incluida la deriva y el ruido aleatorio, que afectan considerablemente la precisión y exactitud de las mediciones.

En los últimos 20 años, se han propuesto varios métodos para mejorar la calidad de las mediciones a través de la estimación de estado. En el trabajo realizado por Kulkarni [1] et. al., construyen un INS fusionando las mediciones de IMU y GPS utilizando el filtrado de Kalman. La implementación del algoritmo se realizó en una placa Raspberry Pi Zero.

En [2] realizan la fusión de información utilizando un acelerómetro y un giroscopio. El filtrado Kalman se utiliza para diseñar un algoritmo de estimación de estado implementado en Arduino. En [3] se propone un algoritmo basado en un filtro Kalman multisensorial que fusiona información de una IMU y un GPS para mejorar las estimaciones globales.

En este contexto, el filtro Kalman federado (FKF) [4-5] ha demostrado ser óptimo cuando se trabaja con sistemas descentralizados para la fusión de información.

En este trabajo, presentamos un algoritmo FKF rápido para aplicaciones en sistemas de navegación inercial en tiempo real. El FKF diseñado se validó en el entorno Matlab y la implementación se realizó en el lenguaje de programación C++ utilizando el Qt Creator IDE (*Interface Development Environment*). Los resultados obtenidos se compararon con otro algoritmo del estado del arte, donde el FKF tuvo el mejor rendimiento.

En la Sección 2 presentamos la descripción del filtro Kalman Clásico. La Sección 3 describe los conceptos de fusión de sensores. En la Sección 4 se presenta el filtro kalman federado y sus ecuaciones principales. La Sección 5 presenta los resultados de la simulación en entorno Simulink. La Sección 6 los resultados de la implementación en entorno Qt Creator, y la Sección 7 los resultados de la experimentación. Finalmente, la Sección 8 presenta las conclusiones.

2. El filtro Kalman clásico

El filtro Kalman clásico se ha utilizado ampliamente en la estimación de parámetros de diversos modelos dinámicos. Una de sus importantes características es su recursividad, ya que con esto se reduce considerablemente el costo computacional, además de que se puede adaptar fácilmente a cualquier proceso de tiempo real. Los principales términos de un filtro Kalman son los siguientes:

- $\mathbf{x}_k$ = vector de estados en el tiempo t_k.
- $\mathbf{\Phi}_k$ = matriz de transición de estados en el tiempo t_k.
- $\mathbf{w}_k$ = vector de ruido del proceso en el tiempo t_k.
- $\mathbf{z}_k$ = vector de mediciones en el tiempo t_k.
- $\mathbf{H}_k$ = matriz de conexiones entre en vector de estados y el vector de mediciones en tiempo t_k.
- $\mathbf{v}_k$ = vector de error de mediciones en el tiempo t_k.
- $\hat{\mathbf{x}}_k$ = estimación actualizada en el tiempo t_k.
- $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ = predicción de estimación en tiempo t_k.
- $\mathbf{K}_k^{opt}$ = matriz de ganancias Kalman en timepo t_k.
- $\mathbf{e}_k^- = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k^-$, error de estimación *a priori*.
- $\mathbf{e}_k = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k$, error de estimación *a posteriori*.
- $\mathbf{I}$ = matriz identidad.

También se utilizan las siguientes matrices de covarianza:

- $E[\mathbf{w}_k\mathbf{w}_k^T] = \mathbf{Q}_k$.
- $E[\mathbf{v}_k\mathbf{v}_k^T] = \mathbf{R}_k$.
- $E[\mathbf{w}_k\mathbf{v}_k^T] = \mathbf{0}$.
- $\mathbf{P}_k = E[\boldsymbol{e}_k\boldsymbol{e}_k^T]$.
- $\mathbf{P}_k^- = E[\mathbf{e}_k^-\mathbf{e}_k^{-T}]$.

Las ecuaciones del filtro Kalman son las siguientes:

$$\mathbf{K}_k^{opt} = \mathbf{P}_k^-\mathbf{H}_k^T(\mathbf{H}_k\mathbf{P}_k^-\mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}, \tag{6}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k^{opt}(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k\hat{\mathbf{x}}_k), \tag{7}$$

$$\mathbf{P}_k = \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_k^{opt}\mathbf{H}_k\right)\mathbf{P}_k^-, \tag{8}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- = \mathbf{\Phi}_k\mathbf{x}_k, \tag{9}$$

$$\mathbf{P}_{k+1}^- = \mathbf{\Phi}_k\mathbf{P}_k\mathbf{\Phi}_k^T + \mathbf{Q}_k. \tag{10}$$

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 30, pp. 443 - 454.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

El ciclo del filtro Kalman básico se muestra en la Figura 1. En la Figura 2 muestra un ejemplo de implementación de un filtro Kalman utilizando un sistema dinámico de primer orden. Se muestra la posición verdadera (negra) y la estimada (roja). Esta última se obtiene a partir de las mediciones simuladas del sensor (azul), con lo cual se corrobora visualmente como la señal estimada es mejor que la señal de mediciones. El filtro Kalman garantiza que al menos, el 68% de las estimaciones se mantendrán dentro de los límites 2-sigma.

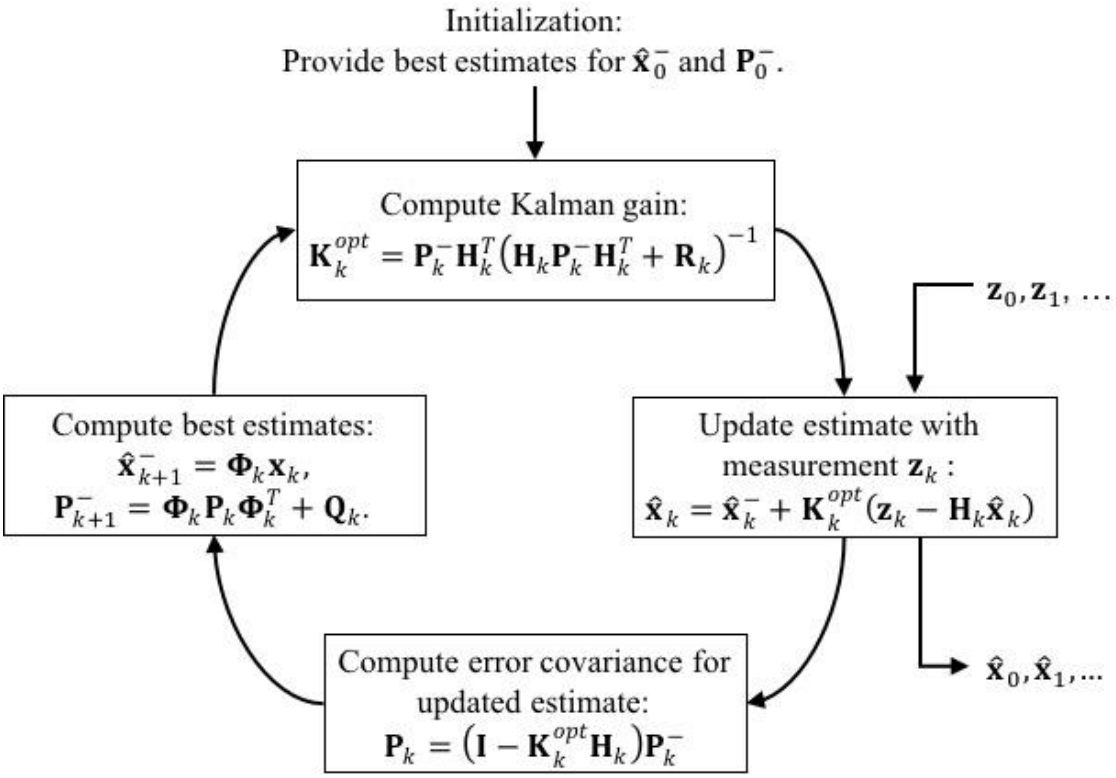


Fig. 1. Ciclo de muestreo del filtro Kalman clásico.

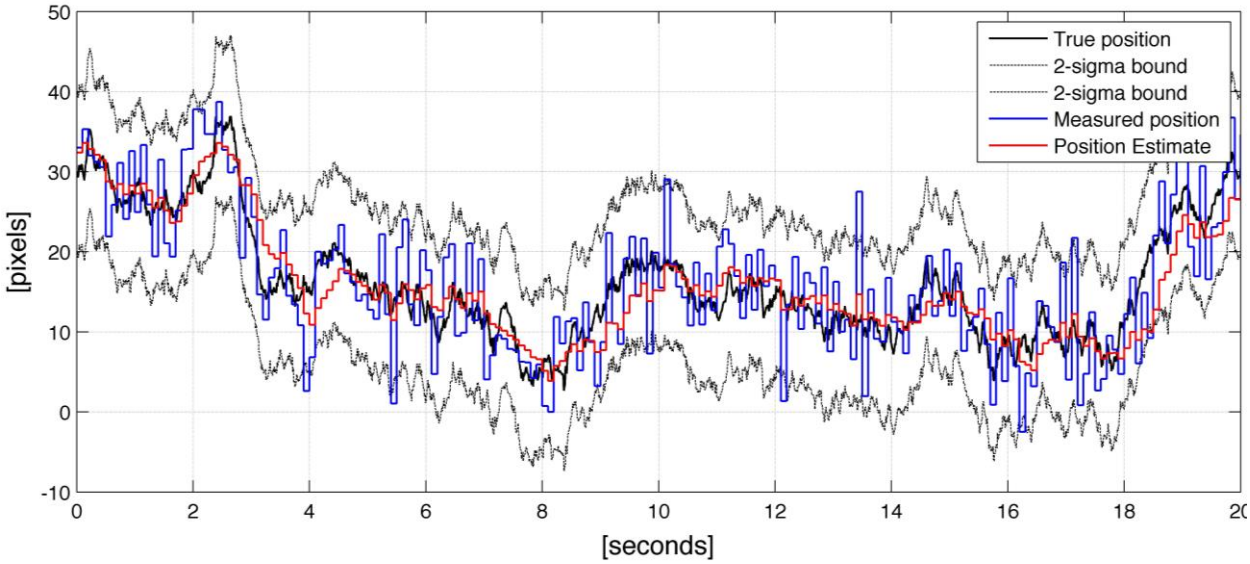


Fig. 2. Ejemplo de implementación del filtro Kalman.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 30, pp. 443 - 454.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

3. Fusión de sensores

Cuando se realizan mediciones de algún proceso importante, es posible que se cuente con un solo sensor y que sus resultados no sean confiables. Además, sin redundancia, el proceso de medición se detendrá por completo en caso de falla del sensor.

La estrategia de fusión de sensores también es conocida como fusión de información, integración de sensores o fusión de datos. Consiste en utilizar dos o mas sensores para medir un conjunto de parámetros de un entorno o fenómeno físico. Estos sensores pueden ser del mismo tipo o no.

En [6], Muri H. et. al. describen tres configuraciones que puede tener un arreglo para fusión de sensores:

- Configuración cooperativa La fusión de sensores puede configurarse de forma cooperativa cuando dos sensores independientes monitorizan los mismos parámetros para obtener más información sobre un proceso que la información obtenida al utilizar un solo sensor.

- Configuración competitiva La configuración de sensores puede configurarse de forma competitiva si los sensores monitorizan parámetros independientes de la misma propiedad. De esta forma, los sensores con la mayor relación señal-ruido, o los sensores que tienen una respuesta acorde a un modelo estadístico, se incluirán en los cálculos de parámetros. Los sistemas competitivos a menudo se pueden combinar con la configuración cooperativa.

- Configuración complementaria Una configuración de fusión de sensores complementaria aplica sensores que monitorizan dos entornos diferentes o monitorizan los mismos entornos con dos sistemas de sensores diferentes e independientes con diferentes funciones de señal y ruido.

La Figura 3 muestra la arquitectura de un sistema de fusión de sensores, la cual consta de un arreglo de sensores, un sistema de cómputo de datos para preprocesamiento (alistamiento de la información) y finalmente un algoritmo de fusión de sensores.

En la siguiente sección mostramos el filtro Kalman federado, el cual es ampliamente utilizado para fusión de sensores en una configuración cooperativa.

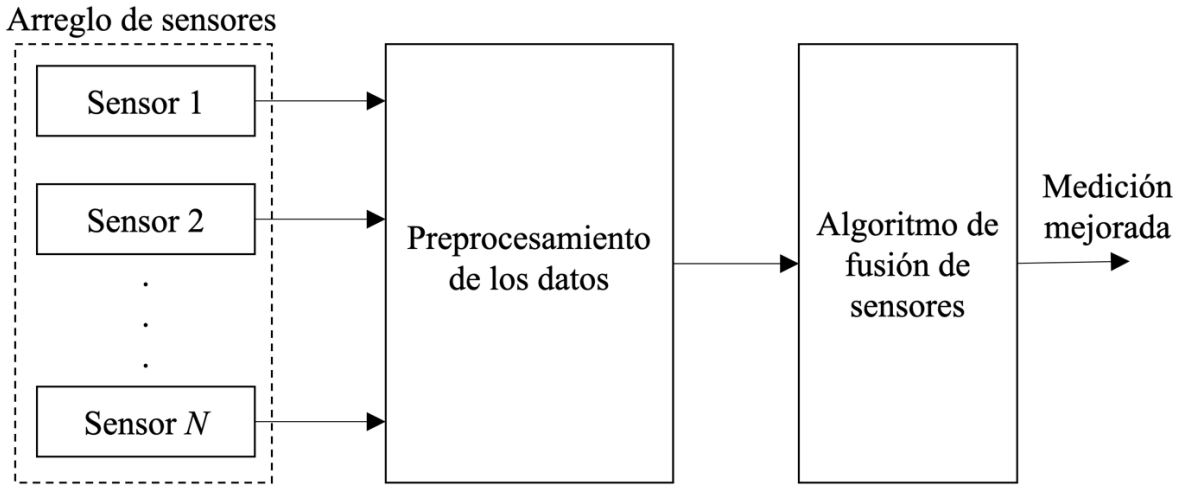


Fig. 3. Arquitectura de un sistema integrado para fusión de sensores.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 30, pp. 443 - 454.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

4. El filtro Kalman federado

El filtro Kalman federado fue propuesto por Carlson en [4] y se ha utilizado para la estimación de parámetros y el filtrado de señales para sistemas descentralizados. Al aumentar la matriz de covarianza de errores se reduce el ruido de proceso común, lo que mejora las estimaciones globales. Además, se pueden realizar estimaciones locales sin ignorar las posibles dependencias globales entre estados. La idea principal es fusionar la información de varios sensores para proporcionar mediciones mejoradas.

Las ´principales ecuaciones del filtro Kalman federado se presentan en la Figura 4, donde x_i es el vector de estados, Φ_i la matriz de transición de estado, P_i la matriz de covarianza, Q_i la matriz de covarianza de ruido del proceso, K_i la ganancia Kalman, H_i la matriz de observación, z_i el vector de mediciones, R_i la matriz de covarianza del ruido de las mediciones, I la matriz identidad, n el número de sensores utilziados y ω_i un factor de ponderación.

El algoritmo recursivo permite actualizaciones periódicas. En cada ciclo se actualizan las estimaciones locales y globales. En caso de fallo de un sensor, los sensores disponibles seguirán funcionando manteniendo la estructura federada. La Figura 5 presenta un diagrama a bloques del filtro Kalman federado.

El arreglo de sensores proporciona las señales originales de las mediciones realizadas. Estas señales son sometidas a una etapa de preprocesamiento de datos, donde se realizan ajustes importantes como escalamiento y cambio de unidades. Después, las señales acondicionadas alimentan a un banco de filtros Kalman donde se realizan las estimaciones locales, para finalmente alimentar al filtro principal o maestro. Este, mediante funciones probabilísticas, determina el mejor valor estimado.

En las referencias [7-9] se muestran diversas aplicaciones del filtro Kalman federado en robótica y procesamiento de señales.

Local estimation for the i-th filter:

$$\hat{x}_i^-(k) = \Phi_i \hat{x}^{\text{fus}}(k-1),$$

$$P_i^-(k) = \Phi_i \left[n P_i^{\text{fus}}(k-1) \right] \Phi_i^T + \frac{1}{\omega_i} Q_i,$$

$$K_i = P_i^-(k) H_i^T \left[H_i P_i^-(k) H_i^T + R_i \right]^{-1},$$

$$\hat{x}_i(k) = \hat{x}_i^-(k) + K_i [z_i(k) - H_i \hat{x}_i^-(k)],$$

$$P_i(k) = (I - K_i H_i) P_i^-(k).$$

Global estimation:

$$P^{\text{fus}}(k) = \{ [P_i(k)]^{-1} + \cdots + [P_n(k)]^{-1} \}^{-1},$$

$$\hat{x}^{\text{fus}}(k) = P^{\text{fus}}(k) \{ [P_i(k)]^{-1} \hat{x}_i(k) + \cdots + [P_n(k)]^{-1} \hat{x}_n(k) \}.$$

Figura. 4. Ecuaciones del filtro Kalman federado.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 30, pp. 443 - 454.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

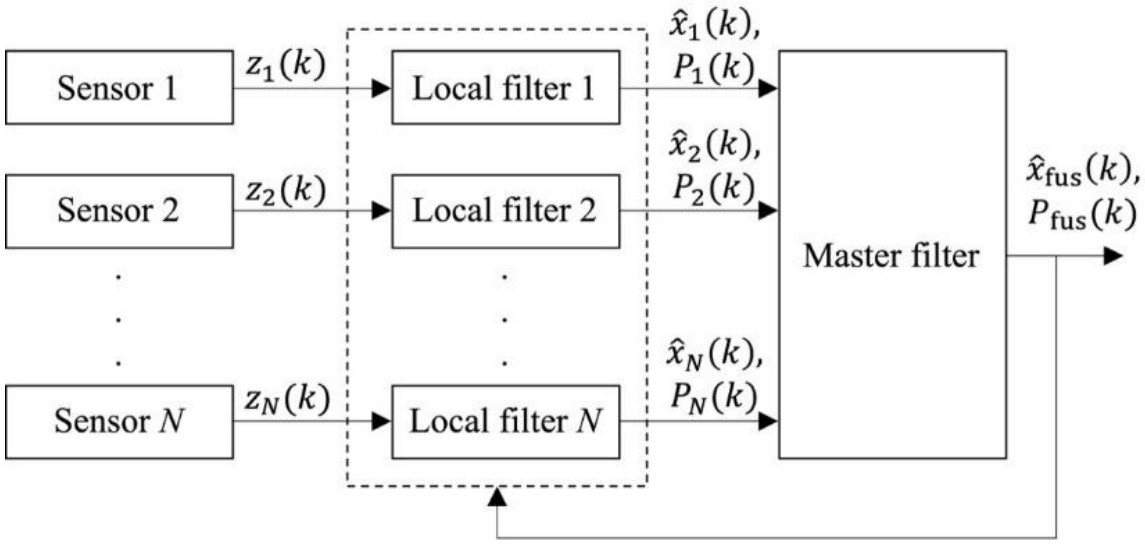


Figura. 5. Diagrama a bloques del filtro Kalman federado.

5. Resultados de simulación

Para la simulación del algoritmo, se utilizaron tres sensores con el fin de proporcionar mediciones unidimensionales del ángulo de alabeo de un cuerpo rígido expresado en grados. Cada filtro Kalman interno incluye un modelo básico de estimación de velocidad constante. Se utilizó una desviación estándar de 1,5 grados y una covarianza de ruido de proceso de 1 m^2/s^3. El filtro Kalman federado diseñado se etiquetó como FKF1D3S.

Las mediciones del sensor original se simularon con 1,5 grados de precisión. La señal de referencia fue una medición de movimiento de balanceo en grados con comportamiento sinusoidal.

Para la evaluación del desempeño, se simuló un filtro Kalman clásico adicional y se etiquetó como KFCV. Este se basa en un modelo de movimiento de velocidad constante.

La Figura 6 muestra los errores cuadráticos medios (RMSE, del inglés *root mean square error*) para los algoritmos KFCV y FKF1D3S. Desde el comienzo de la simulación, el algoritmo FKF1D3S presenta un mejor rendimiento. La Figura 7 compara el RMSE de los sensores con el algoritmo diseñado.

El rendimiento es claramente visible porque se redujo la amplitud de los errores y, en consecuencia, se obtienen mediciones de alta precisión. La Tabla 1 muestra los valores RMSE finales después de un minuto de simulación de los algoritmos, donde el FKF1D3S tuvo el mejor rendimiento.

La evaluación de desempeño de algoritmos juega un papel muy importante a la hora de generar estimaciones de alta calidad. Existen sistemas mecatrónicos en tiempo real, que por su naturaleza, necesitan generar movimientos muy precisios, los cuales dependen directamente de la precisión de sus sensores. Algunos de estos sistemas son las plataformas giroestabilizadas, sistemas mecatrónicos para cirugía robótica y sistemas de armas guiadas.

En la siguiente sección presentamos este algoritmo convertido al lenguaje de programación C++ para la implementación en tiempo real.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 30, pp. 443 - 454.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

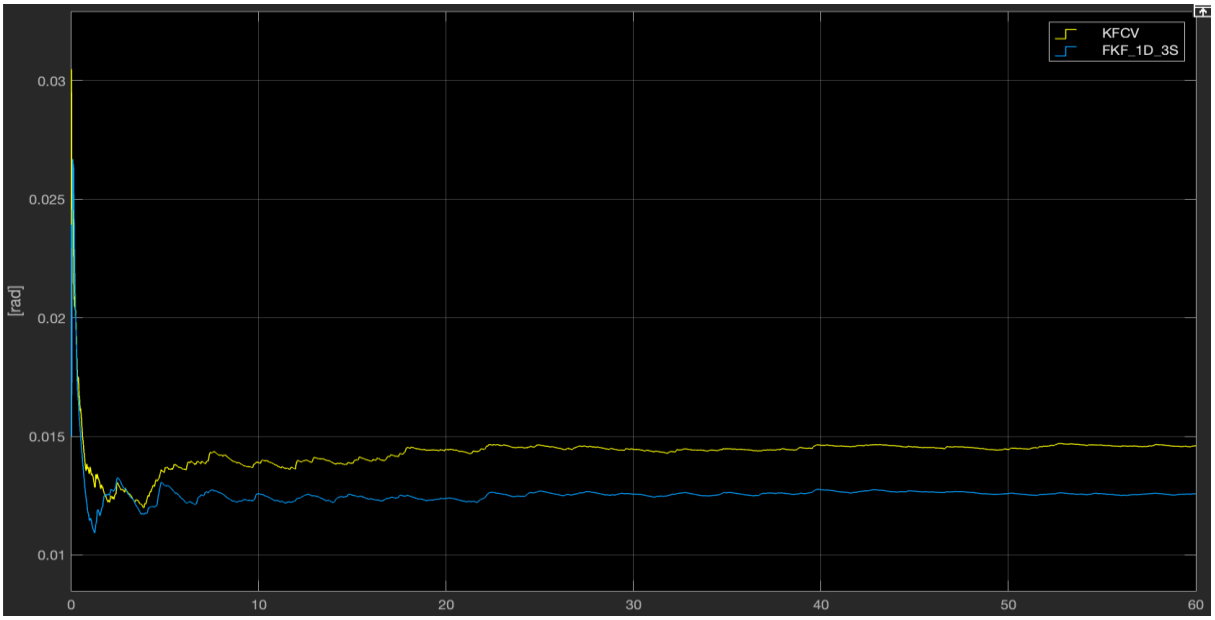


Figura. 6. Gráficas del error cuadrático medio para los algoritmos KFCV y FKF1D3S

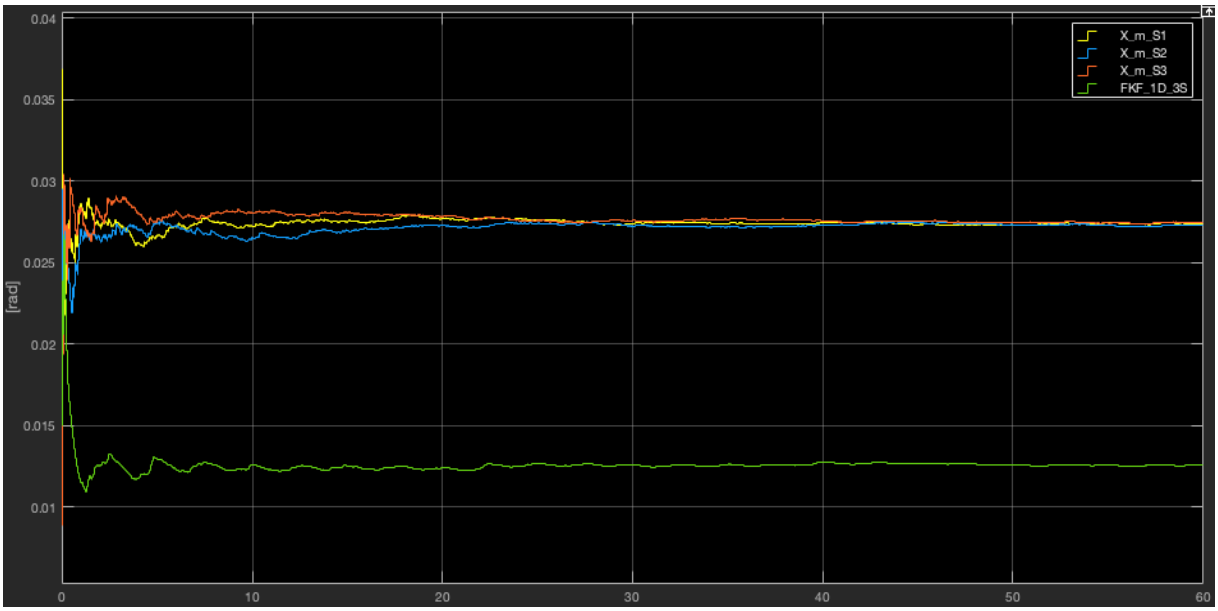


Figura. 7. Gráficas del error cuadrático medio para los sensores y el algoritmo FKF1D3S

Tabla 1. Valores de error cuadrático medio obtenidos en el entorno Simulink.

Algoritmo o sensor	RMSE [deg]
Sensor A	1.568
Sensor B	1.564
Sensor C	1.572
KFCV	0.8359
FKF1D3S	**0.6343**

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 30, pp. 443 - 454.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

6. Resultados de la implementación del algoritmo en tiempo real

Para la implementación en tiempo real en lenguaje C++, se utilizó el software Simulink Coder. Después de la validación del algoritmo en entorno Simulink, se realizaron las configuraciones necesarias del software, incluidas las definiciones de entradas y salidas. Luego se construyó y se compiló el programa en C++. La Figura 8 muestra un diagrama de bloques de este procedimiento.

La Figura 9 muestra los valores RMSE obtenidos en el entorno Qt Creator. En este caso, se implementó la clase C++ generada y se definieron todos los parámetros y señales necesarias. Se utilizó una clase C++ adicional para la evaluación de desempeño del algoritmo KFCV. En los resultados obtenidos, el algoritmo FKF1D3S tuvo el mejor rendimiento.

La Figura 10 muestra el efecto de filtrado de señal del algoritmo FKF1D3S en comparación con las mediciones del sensor A. El resultado obtenido es una señal estable con mejor precisión. La Tabla 2 muestra los valores RMSE finales después de un minuto de implementación de algoritmos en tiempo real donde el filtro FKF1D3S tuvo el mejor rendimiento. El algoritmo diseñado se puede integrar fácilmente en un sistema de navegación inercial para la fusión de sensores en tiempo real.

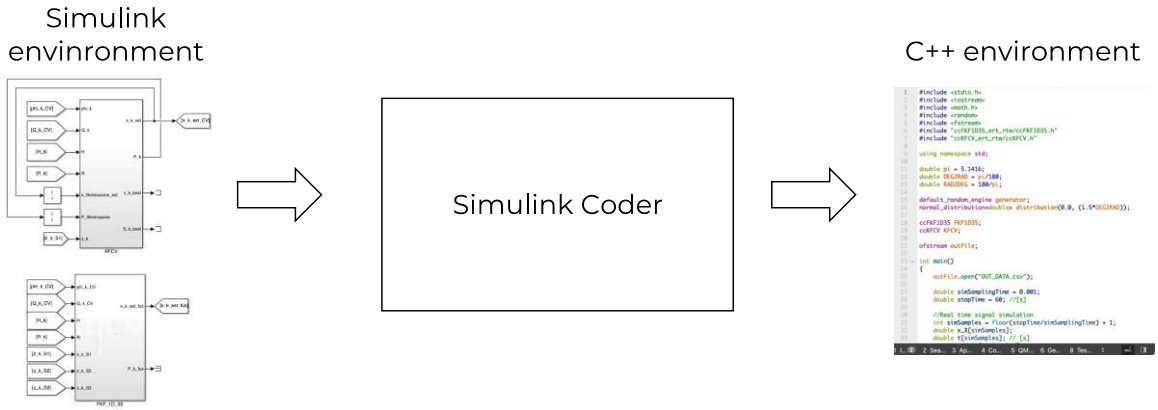


Figura 8. Implementación de algoritmos en lenguaje de programación C++.

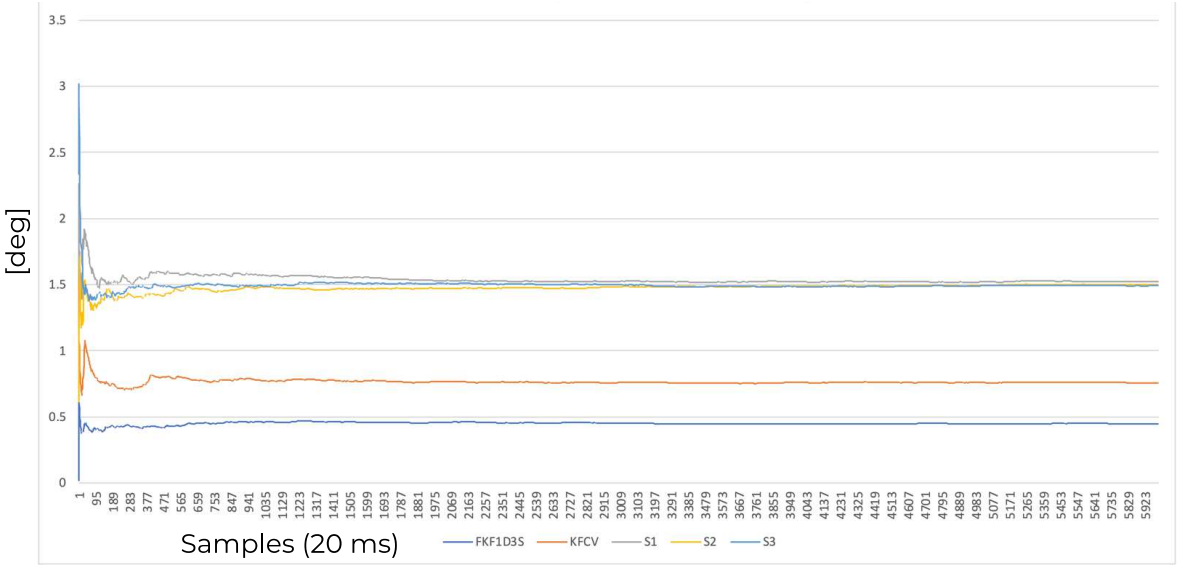


Figura 9. Gráficas del error cuadrático medio para los algoritmos y los sensores.

Tabla 1. Valores de error cuadrático medio obtenidos en el entorno Qt Creator.

Algoritmo o sensor	RMSE [deg]
Sensor A	1.523
Sensor B	1.5
Sensor C	1.493
KFCV	0.756
FKF1D3S	**0.448**

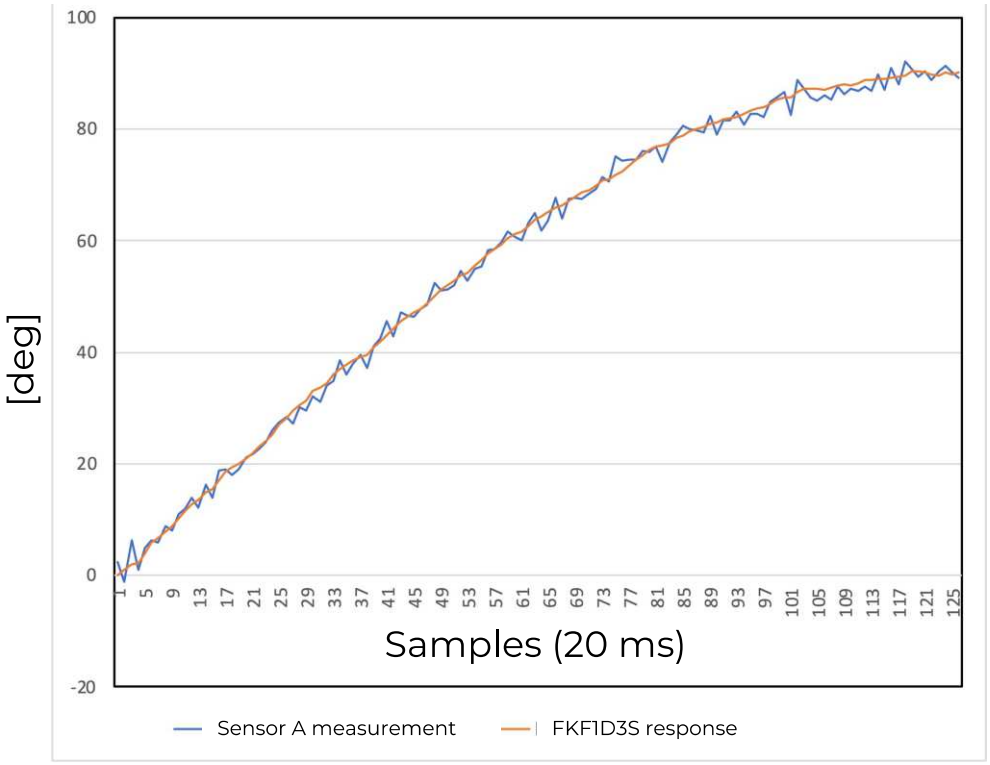


Fig. 10. Filtrado de señales utilizando el algoritmo FKF1D3S.

7. Resultados experimentales

Para los primeros resultados experimentales, se desarrolló una prototipo con el fin adquirir las señales de tres sensores diferentes. El diagrama a bloques de este prototipo se muestra en la Fig. 11. La etapa de preprocesamiento de señales y la implementación del filtro Kalman federado se realizó en una tarjeta de procesamiento de datos Raspberry 4.

Para grabación de señales, se desarrolló un software de adquisición de datos para medir en tiempo real las señales de los tres sensores cada dos milisegundos. También se guardó la salida del filtro Kalman federado para ser comparado con las señales de los sensores.

Para generar movimiento el prototipo se montó rígidamente sobre un vehículo terrestre, el cual siguió una ruta entre las montañas de las localidades de Piletas y Acajete, Veracruz. La ruta se muestra en la Figura 12.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 30, pp. 443 - 454.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

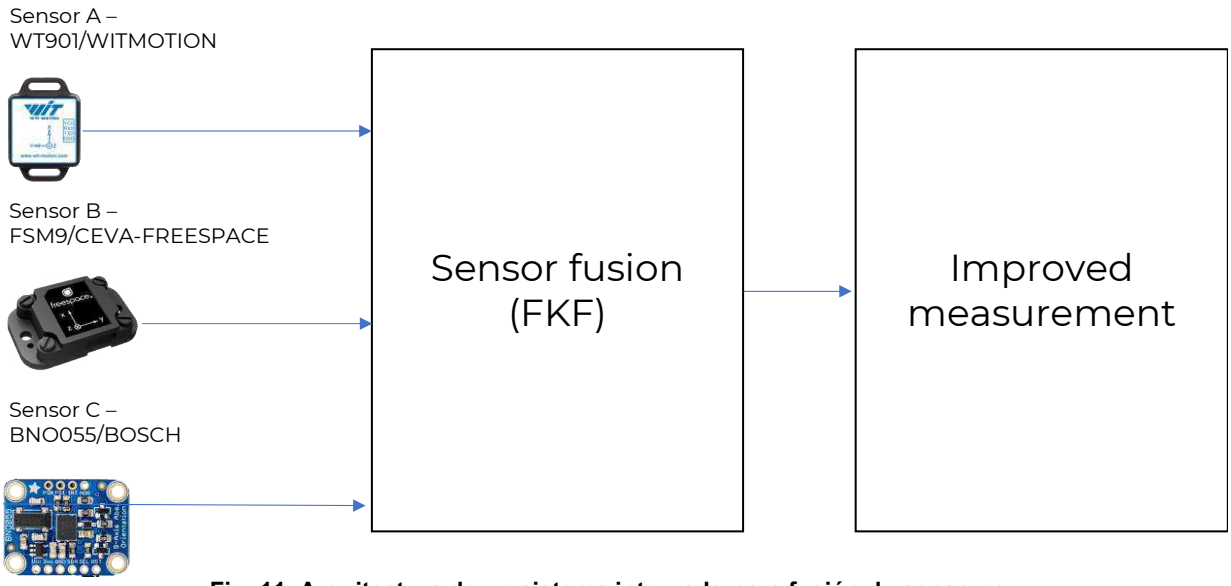


Fig. 11. Arquitectura de un sistema integrado para fusión de sensores.

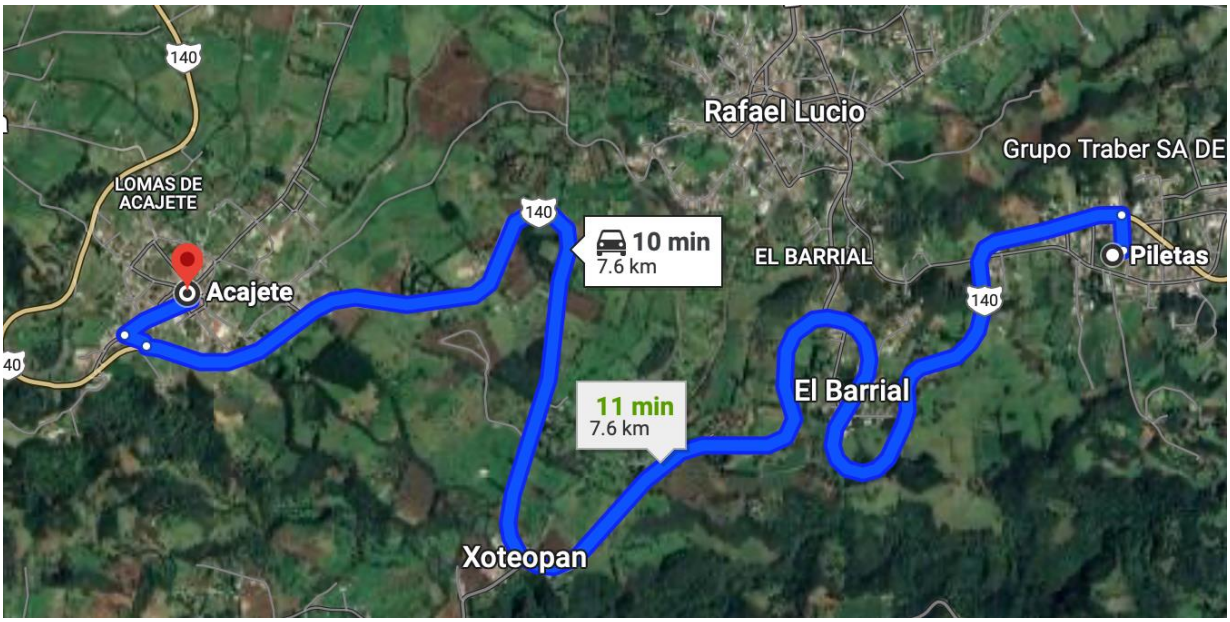


Fig. 12. Ruta del vehículo terrestre para pruebas del prototipo de fusión de sensores.

Las Figuras 12 y 13 muestran las señales adquiridas de alabeo y cabeceo del vehículo, respectivamente. Fueron grabadas en el momento de atravesar las montañas de Veracruz. Las señales de los tres sensores se pueden comparar contra las del algoritmo de filtro Kalman federado. Se observa que es una señal mas estable, con menos ruido y con valores muy similares a los de los demás sensores.

Este filtro Kalman federado ha sido implementado en tiempo real, con una latencia muy baja de apenas dos milisegundos. Puede aplicarse a sistemas de navegación inercial donde la tasa de envío de información sea de un valor alto. Los próximos experimentos se realizarán considerando un sensor de referencia para comparación con los algoritmos desarrollados.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 30, pp. 443 - 454.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

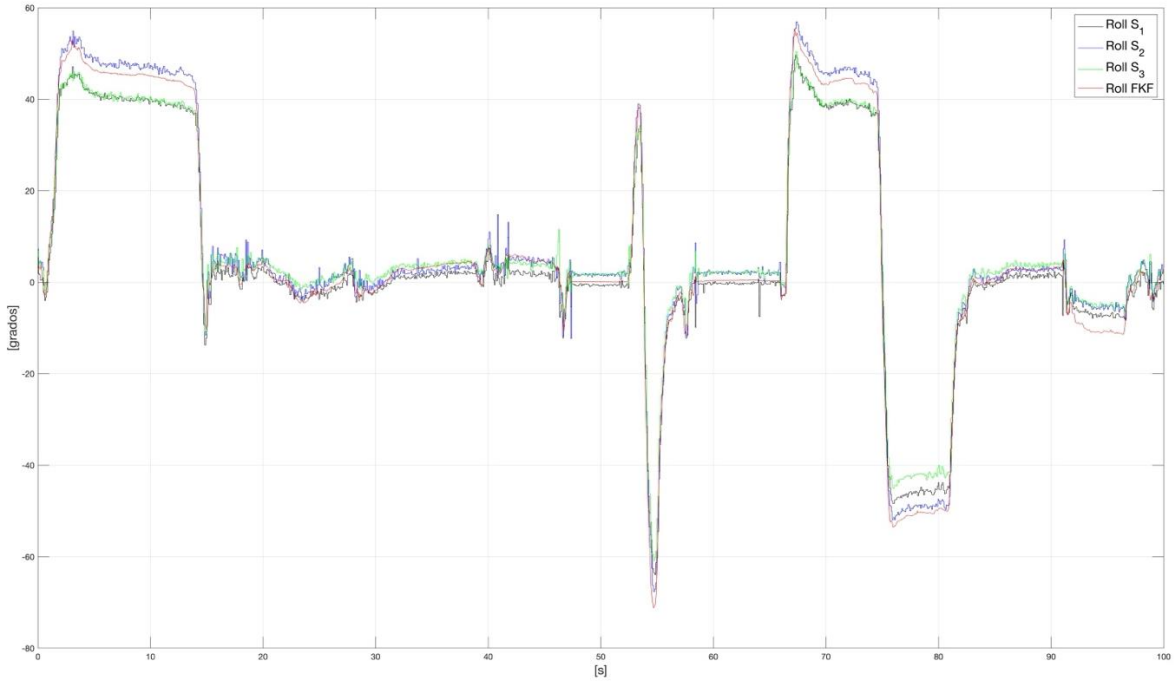


Fig. 12. Resultados experimentales en alabeo (*roll*).

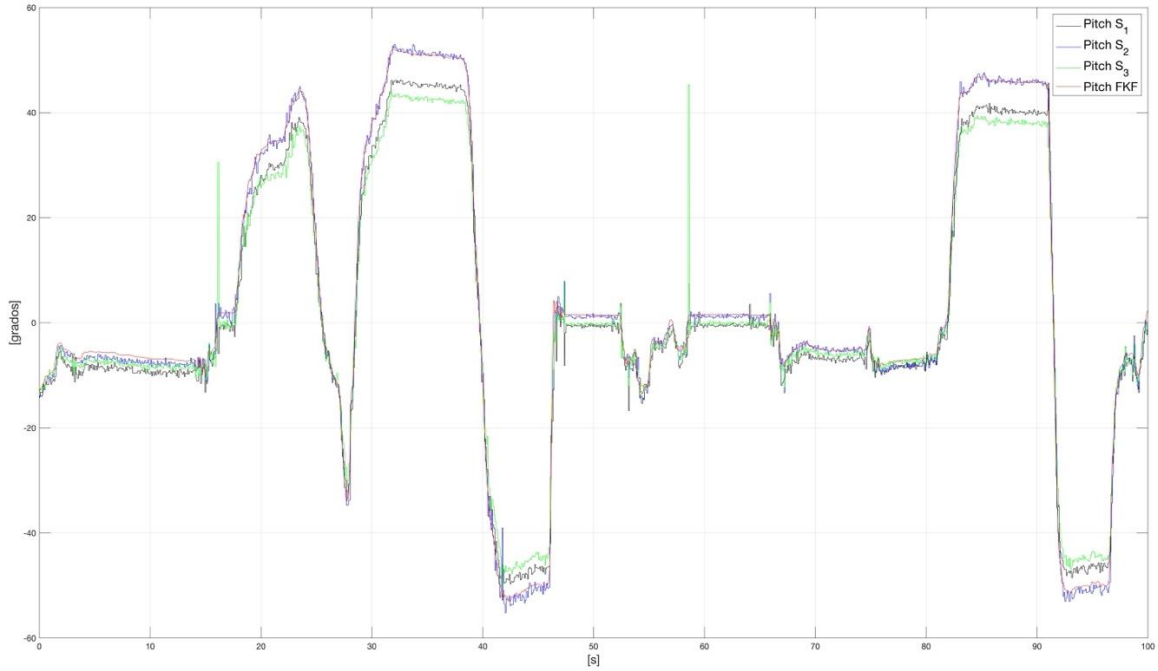


Fig. 13. Resultados experimentales en cabeceo (*pitch*).

8. Conclusiones

En este trabajo se diseñó un Filtro de Kalman Federado para aplicaciones en sistemas de navegación inercial. El algoritmo se diseñó en el entorno Matlab/Simulink y luego se tradujo al IDE Qt Creator para su implementación y validación en tiempo real. Para la evaluación del desempeño, se diseñó y evaluó un Filtro de Kalman en ambos entornos, midiendo y comparando errores cuadráticos medios durante una prueba de filtrado de señales.

El Filtro de Kalman Federado diseñado tuvo el mejor desempeño en ambos entornos, volviéndose adecuado para la fusión de sensores en tiempo real. El programa C++ resultante se puede integrar fácilmente en un sistema de navegación inercial embebido.

Para las pruebas experimentales se construyó un prototipo con un arreglo de tres sensores para poder implementar el algoritmo desarrollado en tiempo real. Los resultados mostraron una señal de salida muy estable, con menos ruido y con valores muy parecidos a los de los sensores.

Los próximos experimentos se realizarán incluyendo un cuarto sensor que servirá como referencia. Sus señales de salida podrán ser comparadas con los algoritmos desarrollados.

Agradecimientos. Los autores de este trabajo reconocen las valiosas contribuciones realizadas por el Instituto Politécnico Nacional de México y el CONAHCYT de México.

Referencias

[1] A. D. Kulkarni, G. G. Narkhede and S. N. Motade, "SENSOR FUSION: An Advance Inertial Navigation System using GPS and IMU," 2022 6th International Conference On Computing, Communication, Control And Automation (ICCUBEA, Pune, India, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCUBEA54992.2022.10010952.
[2] G. G. Redhyka, D. Setiawan and D. Soetraprawata, "Embedded sensor fusion and moving-average filter for Inertial Measurement Unit (IMU) on the microcontroller-based stabilized platform," 2015 International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT), Bandung, Indonesia, 2015, pp. 72-77, doi: 10.1109/ICACOMIT.2015.7440178.
[3] Francois Caron, Emmanuel Duflos, Denis Pomorski, Philippe Vanheeghe, GPS/IMU data fusion using multisensor Kalman filtering: introduction of contextual aspects, Information Fusion, Volume 7, Issue 2, 2006, Pages 221-230, ISSN 1566-2535.
[4] N. A. Carlson, “Federated Filter for Fault-tolerant Integrated Navigation Systems,” in Proceedings of the IEEE Position Location and Navigation Symposium (PLANS’88), Orlando, Florida, USA, 1988, pp. 110–119, record ‘Navigation into the 21st Century’.
[5] N. A. Carlson, “Information-sharing Approach to Federated Kalman Filtering”, in Proceedings of the IEEE Aerospace and Electronics Conference 1988 (NAECON 1988), Dayton, Ohio, USA, May 1988.
[6] Muri, H.I., Wahl, M. Lamb, J. J., Snilsberg, R- K. Hjelme, D. R. (2020). Sensor Fusion. In: Lamb, J., Pollet, B. (eds) Micro-Optics and Energy, Springer, Cham.
[7] T. Ayabakan, ”RSSI-Based Indoor Positioning via Adaptive Federated Kalman Filter”, IEEE Sensors Journal, Vol. 22, Iss. 6, 2022.
[8] X. Xiao, J. Liu, “Adaptive Fault-tolerant Federated Filter with Fault Detection Method Based on Combination of LSTM and Chi-square Test”, 40th Chinese Control Conference (CCC), 2021.
[9] X. Xu, F. Pang, et. al., “An Indoor Mobile Robot Positioning Algorithm Based on Adaptive Federated Kalman Filter”, IEEE Sensors Journal, Vol. 21, Iss. 20, 2021.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 31, pp. 455 - 466.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Diseño de un Sistema de Visión Artificial para la Identificación de Larvas de Palomilla Dorso de Diamante en Cultivos de Brócoli

Muñoz Gutiérrez Raúl Antonio[1], Santoyo Mora Mauro[1], Martínez Nolasco Coral[1], Martínez Nolasco Juan José[1] y Guevara Acevedo Luis Patricio[2].

Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Tecnológico Nacional de México en Celaya, 38010, Celaya, Guanajuato, México[1].
Tecnológico Nacional de México - Campus Roque, 38110, Celaya, Guanajuato, México[2].
m2403047@itcelaya.edu.mx

Resumen

El control de plagas es un desafío crucial en la agricultura, en respuesta a esta problemática el Manejo Integrado de Plagas proporciona una serie de herramientas y técnicas que ayudan a los agricultores y expertos en el tema a prevenir la propagación de insectos dañinos y reducir el uso de pesticidas. En este estudio, se desarrolla un sistema de visión artificial para la identificación y monitoreo de larvas de palomilla Dorso de Diamante (Plutella xylostella) en un entorno controlado, utilizando la técnica de segmentación basada en crecimiento de regiones (Region Growing). Los resultados obtenidos mostraron que, aunque el método fue efectivo en la segmentación de algunas imágenes bajo condiciones controladas, presentó limitaciones significativas en entornos con variaciones de iluminación y diferentes morfologías de las larvas. Estas deficiencias afectaron la precisión en la detección y la clasificación, evidenciando que la técnica no es lo suficientemente robusta para el monitoreo continuo en escenarios más complejos. En conclusión, se sugiere la implementación de técnicas más avanzadas, como redes neuronales convolucionales (CNN), las cuales han demostrado ser más eficaces en la identificación de patrones visuales complejos para mejorar el desempeño del sistema y garantizar una identificación precisa.

Palabras clave: Manejo Integrado de Plagas, Sistema de visión artificial, Red neuronal, Segmentación, Técnica de crecimiento de regiones.

Abstract

Pest control is a crucial challenge in agriculture. In response to this problem, Integrated Pest Management (IPM) provides a set of tools and techniques that help farmers and experts prevent the spread of harmful insects and reduce pesticide use. In this study, an artificial vision system is developed for the identification and monitoring of larvae in a controlled environment, using the region-growing segmentation technique. The results showed that although the method was effective in segmenting some images under controlled conditions, it presented significant limitations in environments with varying lighting conditions and different larval morphologies. These deficiencies affected the accuracy of detection and classification, highlighting that the technique is not robust enough for continuous monitoring in more complex scenarios. In conclusion, the implementation of more advanced techniques, such as convolutional neural networks (CNN), is suggested, as they have proven to be more effective in identifying complex visual patterns, thereby improving system performance and ensuring accurate identification under variable conditions.

Keywords: Integrated Pest Management, Artificial Vision System, Neural Network, Segmentation, Region growing technique.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 31, pp. 455 - 466.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

1. Introducción

En la agricultura moderna, el control de plagas representa uno de los mayores desafíos para la sostenibilidad de la producción y la conservación del medio ambiente. Según un estudio de la FAO citado por AGROASEMEX, hasta un 40% de la producción agrícola mundial se pierde por causa de las plagas. En México, se ha señalado que cada año se pierde entre el 20% y el 40% de la producción de alimentos debido a insectos, plagas, o enfermedades de los cultivos [1]. Tradicionalmente, la respuesta a este desafío ha sido el uso intensivo de pesticidas químicos. Sin embargo, esta aproximación ha generado una serie de problemas ambientales, económicos y de salud pública que urgen una solución integradora y sostenible, como lo es el Manejo Integrado de Plagas (MIP).

Una de las consecuencias más alarmantes del uso indiscriminado de pesticidas es el desarrollo de resistencia en las poblaciones de plagas. Este fenómeno reduce la efectividad de los productos químicos, obligando a los agricultores a aplicar dosis cada vez mayores o a buscar alternativas químicas más potentes y, a menudo, más tóxicas. Además, los pesticidas no distinguen entre organismos objetivos y no objetivos, afectando a especies beneficiosas como polinizadores, depredadores naturales de las plagas, y microorganismos del suelo esenciales para la fertilidad de este [2]. Adicionalmente, la contaminación del agua y el suelo por el escurrimiento de estos químicos representa un grave riesgo para los ecosistemas acuáticos y terrestres. Cabe resaltar, que el uso excesivo de pesticidas tiene implicaciones directas en la salud humana y se expone a los trabajadores agrícolas a altos niveles de sustancias tóxicas, lo que aumenta el riesgo de que desarrollen enfermedades crónicas [3].

Como ya se ha mencionado, para enfrentar diversas problemáticas asociadas con los métodos convencionales de control de plagas en la producción agrícola, incluyendo el uso excesivo e inadecuado de pesticidas, surge el MIP [4]. Esta estrategia busca minimizar los daños causados por estos organismos de manera eficiente y ecológica, integrando métodos biológicos, culturales, físicos y químicos. Sin embargo, y a pesar de sus beneficios potenciales, la integración del MIP enfrenta varias deficiencias y desafíos en su implementación a nivel global como son el acceso y costos de la tecnología, capacitación y conocimientos técnicos, así como la integración de datos y análisis. Este último es uno de los desafíos más significativos ya que el uso de métodos tradicionales de obtención de datos obstaculiza la eficiencia de los procesos, especialmente en el análisis rudimentario para medir la densidad de plagas en un cultivo que posteriormente sirve para tomar decisiones acerca del uso de los insecticidas con base en los resultados obtenidos.

Dentro del MIP se hace uso de gráficas de umbral de acción, de donde se puede obtener información del momento adecuado para aplicar una técnica de control de plagas en los cultivos. Con esta identificación oportuna se buscan evitar las consecuencias negativas relacionadas con el uso desmedido de insecticidas, así como la protección de la integridad económica de la producción del cultivo. Su funcionamiento consiste en que primero, una cuadrilla de ingenieros se encarga de tomar muestras para obtener la densidad de larvas por planta. Para esto, generalmente se utiliza el modelo de muestreo denominado como “5 de oros”, el cual se muestra en la Figura 1. El muestreo de “5 de oros” consiste en dividir el cultivo en 5 puntos críticos donde la cuadrilla de ingenieros realiza un conteo rudimentario o tradicional para obtener la cantidad de larvas presentes en cada planta [5].

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 31, pp. 455 - 466.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

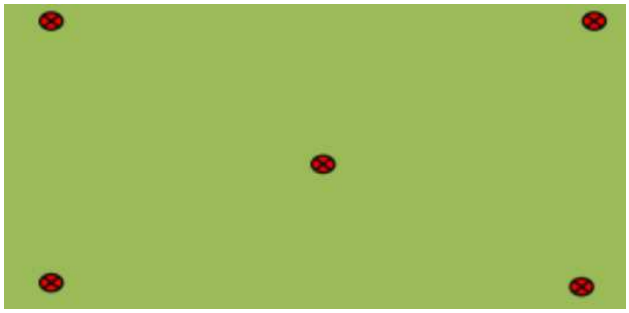


Figura 1. Marco o modelo de muestreo “5 de oros”.

Una vez obtenida la densidad de larvas por planta, se hace uso de la gráfica de umbral de tratamiento relacionada al cultivo de trabajo para conocer el momento de aplicación de la técnica de control de plagas. Se puede observar un ejemplo de gráfica de umbral de tratamiento en la Figura 2. La gráfica muestra el tiempo acotado en días para el eje horizontal, mientras que la densidad de larvas por planta está representada por el eje vertical. Del ejemplo mostrado por la Figura 2, se puede apreciar cómo se representa la variación en la población de insectos (línea verde) a lo largo del tiempo, mostrando el número de insectos en el cultivo. Las variaciones en esta línea indican cambios naturales en la población de plagas o el impacto de las intervenciones de manejo.

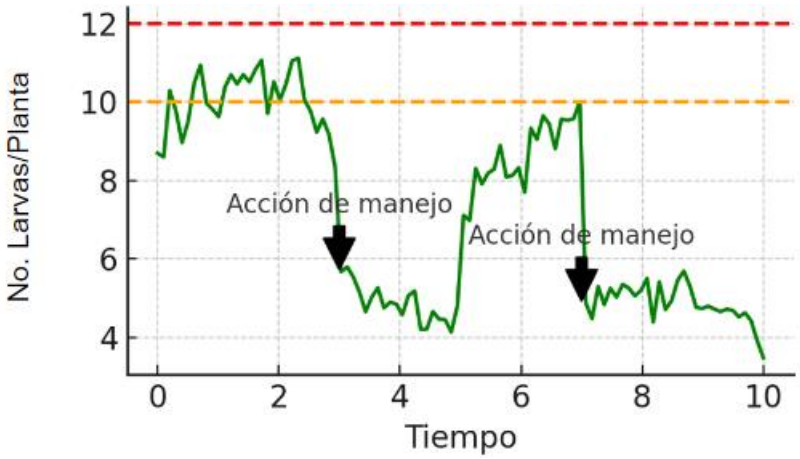


Figura 2. Ejemplificación general de una gráfica de umbral de tratamiento.

Con la finalidad de usar la gráfica de umbral de tratamiento, a ésta se añaden dos líneas horizontales para indicar el Nivel de Daño Económico (NDE) y el Umbral de Tratamiento (UT). El NDE (línea punteada color rojo dentro de la Figura 2) representa el punto en el que el daño causado por las plagas justifica el costo de las intervenciones para su control, siendo particularmente crítica porque señala el punto a partir del cual las pérdidas económicas son inevitables sin acción. Por otro lado, el UT (línea punteada color naranja dentro de la Figura 2) indica el nivel de población de plagas en el cual se deben tomar medidas preventivas para evitar que la población alcance o supere el NDE.

Para indicar momentos claves durante el MIP, dentro de la gráfica de Umbral de Tratamiento se hace uso de flechas verticales y anotaciones de los momentos específicos en que se implementaron medidas de control, tal como se muestra con las flechas contenidas en la Figura 2 para dos acciones de manejo. Estas acciones están diseñadas para reducir rápidamente la población de insectos, lo que se vería reflejado con descensos en la línea de población justo después de cada intervención, denotando la efectividad de las intervenciones; en el ejemplo mostrado de la Figura 2 se aprecia claramente este efecto para los días 3 y 7. Cabe mencionar que la efectividad de las intervenciones es crucial, pues permite mantener a la población de la plaga por debajo del NDE, minimizando así el impacto económico adverso en el cultivo.

Como se ha visto, la gráfica de Umbral de Tratamiento proporciona una representación visual clara sobre cómo se puede gestionar efectivamente la población de plagas mediante la implementación oportuna de técnicas de control en el contexto del MIP. Este tipo de visualización ayuda a agricultores, agrónomos y gestores de recursos a entender y aplicar mejor las prácticas de MIP, destacando la importancia de monitorear continuamente las poblaciones de plagas y responder de manera proactiva para proteger los cultivos y asegurar la sostenibilidad económica y ambiental de las prácticas agrícolas.

Del proceso de aplicación del MIP, se puede identificar que la recolección de datos para el conteo de larvas con base al muestreo de “5 de oros” representa una tarea extenuante y prolongada, que además puede variar dependiendo de las dimensiones del cultivo. Por ello, la implementación de un sistema de visión para la identificación y conteo de insectos plaga surge como una herramienta para el conteo de dichas entidades. Así, al contar con datos precisos, en tiempo real y de monitoreo constante sobre la presencia y densidad de plagas, estos sistemas permitirían la aplicación de estrategias de control más efectivas y menos invasivas, permitiendo a los agricultores adoptar métodos de control más dirigidos y con una respuesta más temprana de las plagas.

Para atender esta necesidad, la presente investigación tiene como finalidad presentar la propuesta de un sistema de visión computarizada utilizando el método de segmentación Region Growing para la identificación y conteo de larvas. De ello, se busca desarrollar un prototipo de sistema capaz de capturar imágenes en cultivos, procesarlas para la detección y el conteo de larvas de tipos de plaga específicos que permitan la digitalización del MIP. Dentro de la segunda sección de este trabajo se aborda la selección de elementos clave para el diseño y construcción de una primera propuesta para el sistema de visión, incluyendo la selección de un algoritmo de procesamiento de imágenes. Posteriormente, en la sección 3 se presentan los primeros resultados de la evaluación del algoritmo propuesto para la detección de larvas de palomilla dorso de diamante, de los cuales se realizan algunas conclusiones respecto a su rendimiento y áreas de mejora, siendo presentadas estas en la última sección de Conclusiones.

2. Metodología

La metodología de trabajo se muestra en el diagrama de la Figura 3, donde cada una de las etapas es descrita a continuación.

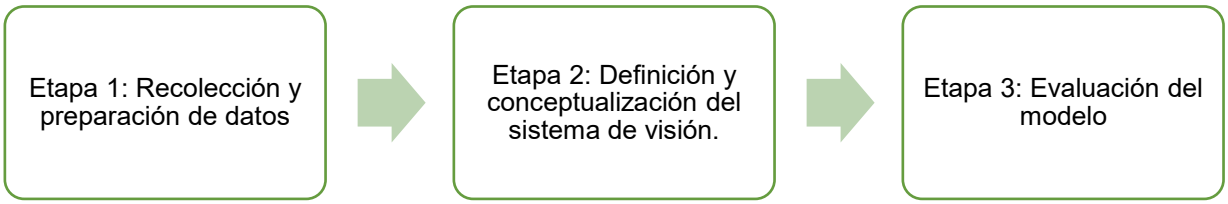


Figura 3. Metodología del diseño de sistema de visión.

2.1 Recolección y preparación de datos

En esta etapa se obtuvieron diferentes imágenes de larvas de palomilla dorso de diamante (alrededor de 100 capturas) en bioensayos de cultivos de brócoli realizados en el laboratorio. Un ejemplo de captura durante la ejecución de estos bioensayos se muestra en la Figura 4. Estas capturas sirven para crear el algoritmo de identificación y conteo de larvas. Además, se obtienen otros parámetros para complementar la base de datos, como es, fecha de las capturas, ventana biológica y número de prueba.

Figura 4. Ejemplo de capturas de larvas durante bioensayo.

2.2 Sistema de visión artificial

Para la construcción del sistema de visión, se utilizó una cámara web Logitech C920s Pro-Full HD 30 fps para realizar la captura de imágenes. Este equipo se eligió así dado que proporciona una resolución y robustez aceptables para realizar la captura de especímenes de larva de palomilla Dorso de diamante cuyas dimensiones van desde los 2 a 10mm de longitud contenidas en una hoja de brócoli introducida en una caja Petri de 90×18mm. En la Tabla 1 se muestran algunas de las características más relevantes de la cámara elegida.

Tabla 1. Características del equipo para la toma de capturas.

Características	Parámetro
Modelo	Cámara web Logitech HD Pro C920
Resolución máxima de video	1920 px x 1080 px
Tipo de resolución máxima de video	Full HD
Resolución de imagen de la cámara	3 Mpx
Interfaces	USB-A 2.0
Funciones	Corrección de iluminación, enfoque automático, luz indicadora

El sistema de visión se desarrolló y probó con una computadora portátil, cuyas características se muestran en la Tabla 2. Este equipo proporciona un rendimiento y velocidad de respuesta elevado dadas las características de sus componentes, lo cual la hace ideal para las tareas propuestas para el sistema de visión artificial.

Tabla 2. Características más relevantes del equipo de cómputo.

Características	Parámetro
Modelo	KATANA 15 B12VGK-813US
Procesador	Intel® Core™ i7-12650H 11va generación
Almacenamiento	SSD 1 TB
Memoria RAM	16 GB
Tarjeta gráfica	GEFORCE RTX 4070

Se planteó un algoritmo en lenguaje de programación Python debido a que, a diferencia de otros lenguajes de programación, ofrece una amplia disponibilidad de librerías de procesamiento de

imágenes, tiene una comunidad muy activa que contribuye constantemente con nuevas herramientas, documentación, foros de soporte y soluciones a problemas comunes. Además, es un lenguaje multiplataforma, lo que significa que el código escrito en un sistema operativo se puede ejecutar en otro con pocos o ningún cambio, esto es especialmente importante en entornos de investigación o desarrollo donde se puede trabajar con distintos sistemas operativos. También se integra fácilmente con otros lenguajes y sistemas. Como una herramienta para Python, existe OpenCV (Open Source Computer Vision Library), que es una biblioteca de código abierto diseñada para realizar tareas de análisis y procesamiento de imágenes creada para proporcionar una infraestructura común para aplicaciones de visión por computadora y para acelerar la adopción del uso de esta tecnología en el entorno de desarrollo [6].

2.3 Etapas del procesamiento y análisis de imágenes

El algoritmo se basó en técnicas de segmentación, específicamente se utilizaron transformaciones espaciales, cambios de espacio de color, operaciones morfológicas, filtrado y detección de bordes. Con las capturas hechas durante los bioensayos, primero se realizó una segmentación de la región de interés, que para este caso correspondió a la hoja que ocupaban las larvas. Posteriormente, se aplicó la técnica de crecimiento de regiones, o *Region Growing*, para identificar secciones en la imagen que pertenecen a las larvas. Este procedimiento se muestra en la Figura 5 de manera general.

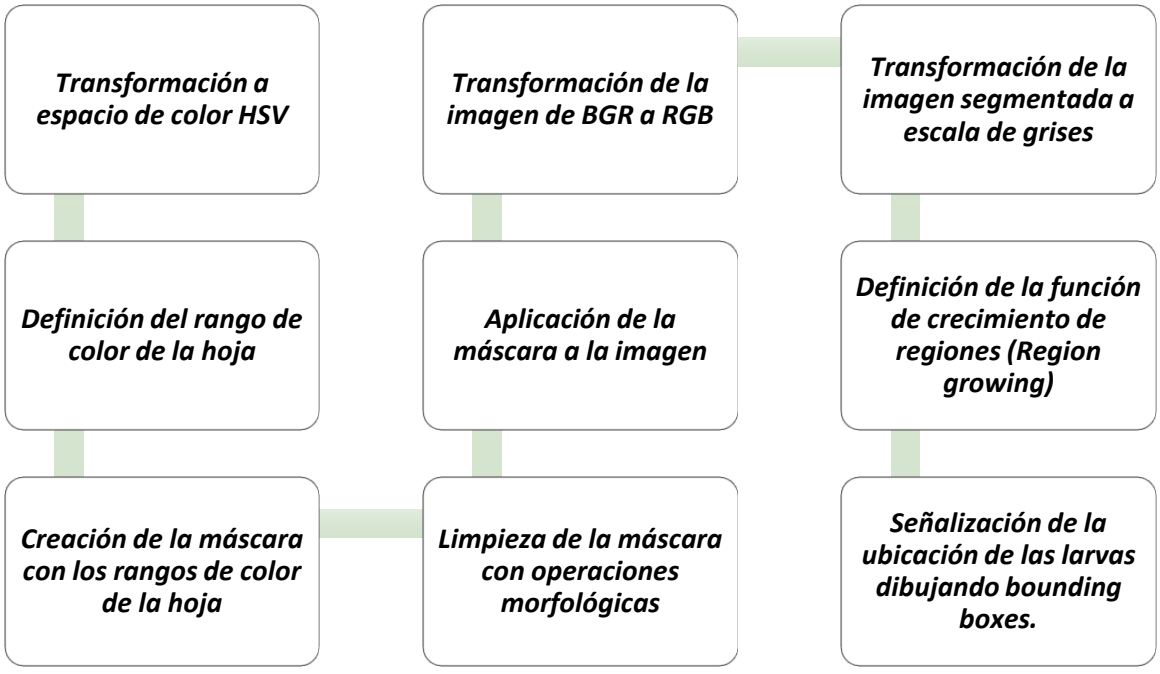


Figura 5. Procedimiento general de la construcción del sistema de visión.

Como se aprecia en procedimiento expuesto por la Figura 5, el proceso inicia con la transformación de la imagen a un espacio de color HSV, esto para facilitar la segmentación basada en color, además de que se utiliza a menudo para la segmentación de imágenes porque ofrece ciertas ventajas sobre el espacio de color RGB en determinadas tareas. En RGB, los valores de color están representados por la combinación de las tres componentes (rojo, verde y azul) sin embargo, los cambios en la iluminación afectan a todos los canales de manera uniforme, lo que puede hacer difícil trabajar con sombras, brillos o luces inconsistentes. HSV descompone el color en tres componentes más fáciles de interpretar: el color en sí mismo (H, *Hue* o Tono), la intensidad o pureza del color (S, *Saturation* o Saturación) y el brillo o la luminosidad del color (V, *Value* o Valor). Esta separación facilita la tarea de

segmentar colores específicos, ya que permite concentrarse únicamente en el componente del Tono, ignorando variaciones de iluminación o saturación que se podrían confundir en RGB. Para este fin, se utilizó la función de “cv2.cvtColor” dentro de OpenCV para obtener una imagen resultante como la mostrada en la Figura 6.

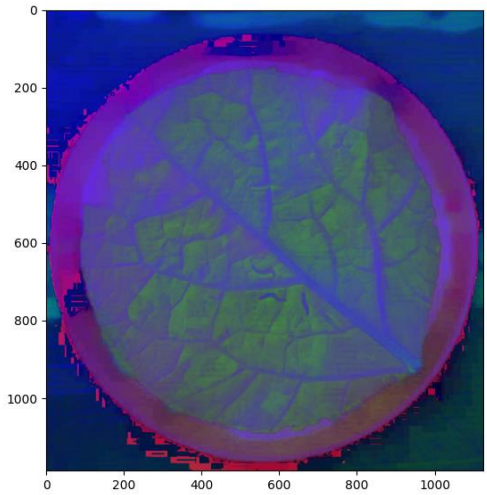


Figura 6. Captura de la hoja en espacio de color HSV.

Una vez que se tiene una imagen representada con el espacio HSV, se definieron los límites inferior y superior para el color verde dentro de este espacio, colores que son característicos de las hojas utilizadas para los bioensayos. Con base en estos valores es que se determina qué tonos se considerarán en la segmentación. Para usar recurrentemente dichos valores se hizo uso de arreglos bajo los nombres de “lower_green” y “upper_green”.

En el siguiente paso se crea una máscara binaria con la función “cv2.inRange” y utilizando el rango de valores para el color verde (“lower_green” y “upper_green”). Como resultado de esta etapa, se logra que los pixeles dentro del rango especificado se redefinan como un color blanco (255) y los que están fuera del rango en negro (0). Dado que la máscara resultante no contaba con las características finales deseadas, ésta se procesó a través de operaciones morfológicas. Con estas operaciones se buscó eliminar el ruido, unir elementos discontinuos, rellenar los huecos presentes y mejorar la estructura global de la hoja.

Una vez teniendo la máscara corregida, se procedió con su aplicación en la imagen original, manteniendo solo las partes de la imagen donde la máscara es blanca (el área de la hoja verde). Se utilizó la instrucción “cv2.bitwise_and” cuya función es realizar una operación lógica AND bit a bit entre dos imágenes o entre una imagen y una máscara, como se visualiza en la figura 7.

Para finalizar la segmentación de la hoja, se transforma la imagen del espacio de color BGR a RGB. Es importante mencionar que, BGR se refiere al orden en que OpenCV maneja los canales de color en las imágenes, por esta razón se requirió volver a convertir a espacio de color RGB, el estándar común de espacio de color que representa cómo los colores se combinan a partir de los tres colores primarios de la luz: rojo, verde y azul.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 31, pp. 455 - 466.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Figura 7. Ejemplo de aplicación de la máscara en una de las capturas.

Para este caso particular, se realizaron pruebas y se definió un sistema de visión basado en la técnica de crecimiento de regiones, como parte del preprocesamiento de la imagen, se tiene que transformar el espacio de color a una escala de grises, ya que el método trabaja de manera más eficiente si se tiene la imagen en estas condiciones, por lo que el primer paso antes de aplicar la técnica de *Region Growing*, fue hacer esta transformación con la función “cv2.cvtColor”. Un ejemplo de imagen resultante se muestra en la Figura 8.

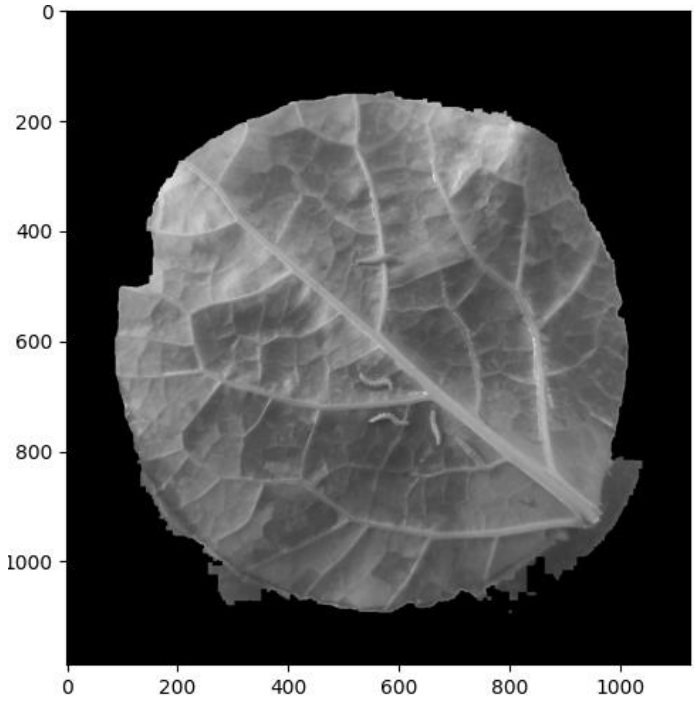


Figura 8. Ejemplo de aplicación de la máscara en una de las capturas.

El método de Region Growing (crecimiento de regiones) es una técnica de segmentación de imágenes utilizada para agrupar píxeles que tienen propiedades similares, como la intensidad o el color

partiendo de un píxel de referencia llamado *semilla*. Este método es particularmente útil para identificar áreas conectadas en una imagen que comparten ciertas características, como las larvas en una hoja [7]. El punto semilla debe estar dentro del área que se desea segmentar, para este contexto, el punto semilla debe de iniciar en cualquier pixel de la imagen perteneciente a la presencia de larvas. También, se utilizó un criterio de similitud, este sirve para decidir si un píxel vecino debe agregarse a la región creciente. Este criterio puede basarse en la intensidad del píxel, el color, o cualquier otra característica relevante, para este caso se utilizó un criterio de similitud basado en el color de la larva. De la misma forma, un umbral predefinido en cada captura de las larvas controla qué tan similares deben ser los píxeles vecinos al punto semilla para ser incluidos en la región. Este umbral se definió dadas las características de los pixeles vecinos del punto semilla elegido en la larva.

Para efectuar la identificación de las larvas una vez que se calibró el sistema a través del Crecimiento de Regiones, se estableció un rango de área (“min_area” y “max_area”) para filtrar los contornos detectados que serán considerados como larvas conforme a sus medidas. Solo los contornos cuya área está dentro de este rango son marcados con cajas o *bounding boxes*. Al filtrar contornos por tamaño, se evita detectar elementos no deseados que no son larvas. Por ejemplo, un área demasiado pequeña puede ser ruido, y un área demasiado grande puede ser parte de la hoja o una sombra.

Para efectuar el marcado de las larvas identificadas, primero se hizo uso de la función “cv2.boundingRect(cnt)” para calcular el rectángulo delimitador más pequeño que puede contener el contorno *cnt*, lo que se hace a través del retorno de las coordenadas (x, y) de la esquina superior izquierda del rectángulo, su anchura (w) y altura (h) por la función. Una vez conocidas estas coordenadas, con la función “cv2.rectangle()” se dibuja un rectángulo sobre el área que ha sido identificada como larva, tal como se muestra en la Figura 9.

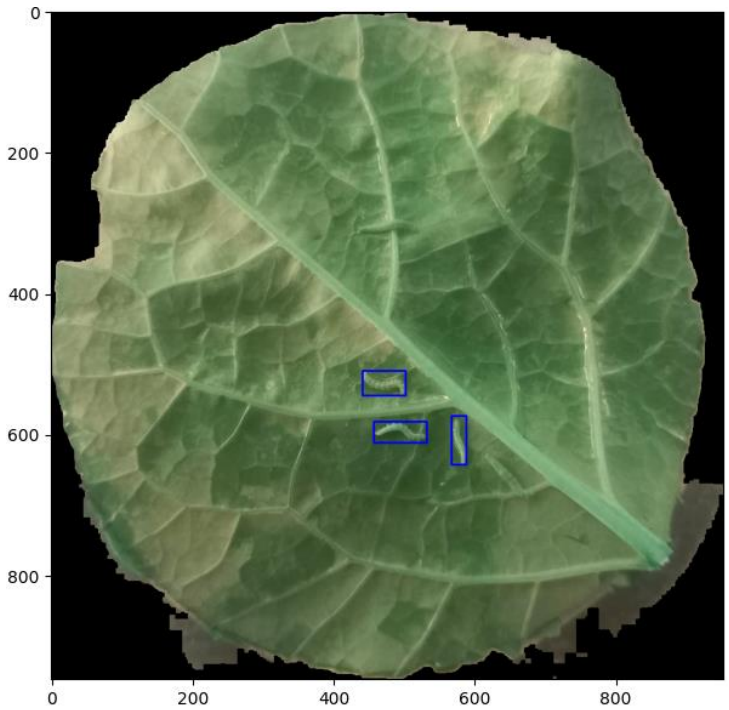


Figura 9. Captura de larvas segmentada por Region Growing.

3. Resultados

A continuación, en la Figura 10 se muestra el resultado de una de las capturas realizadas para visualizar de manera general el proceso de segmentación, comenzando desde la discriminación de la

hoja para delimitar la región de interés, continuando con la aplicación de la técnica de segmentación de *Region Growing*, finalizando con la señalización de la ubicación de posibles larvas en las capturas.

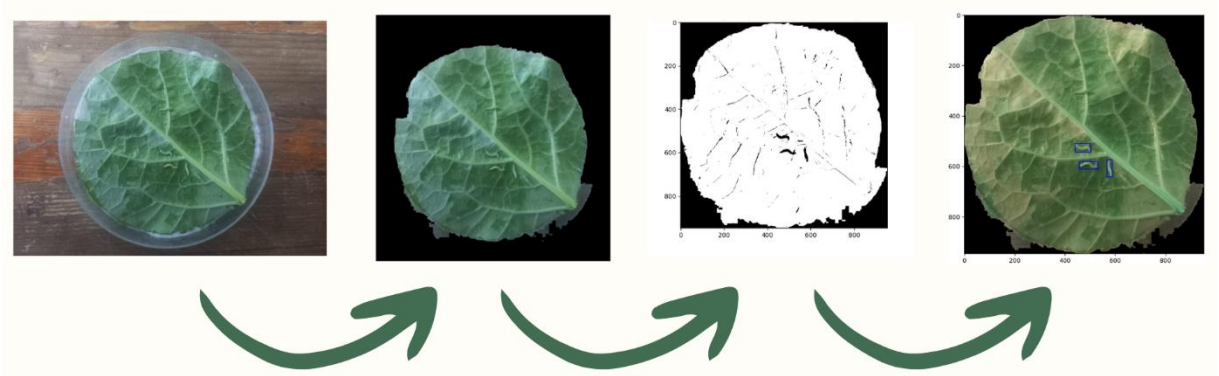


Figura 10. Resultado del proceso de segmentación.

Se realizaron diferentes pruebas con 14 muestras para medir el desempeño del algoritmo y se utilizaron algunas métricas utilizadas para evaluar la precisión de los algoritmos de detección de objetos y segmentación. Las métricas de rendimiento elegidas para este trabajo incluyeron Precisión, Sensibilidad y Puntuación F1. Para el cálculo de estos parámetros, se etiquetaron 72 larvas y 45 no larvas distribuidas en las 14 imágenes de prueba.

La precisión, calculada a través de la ecuación (1), es la proporción de detecciones correctas entre todas las detecciones realizadas por el algoritmo. Respecto a los valores obtenidos de verdaderos positivos y falsos positivos en las imágenes etiquetadas, se obtuvo una precisión del 65.71%.

$$Precisión = \frac{Verdaderos\ positivos\ (TP)}{Verdaderos\ positivos\ (TP)+Falsos\ positivos(FP)} \tag{1}$$

En el caso de la Sensibilidad, que es la proporción de detecciones correctas sobre el total de elementos relevantes en los datos de referencia, se obtuvo un resultado del 68.65%. Este parámetro se calcula a partir de la ecuación (2).

$$Sensibilidad = \frac{Verdaderos\ positivos\ (TP)}{Verdaderos\ positivos\ (TP)+Falsos\ negativos(FN)} \tag{2}$$

Finalmente, la Puntuación F1 es la media armónica entre la Precisión y la Sensibilidad, proporcionando una medida equilibrada de ambas. Su valor se obtiene por medio de la ecuación (3). Para las 14 imágenes utilizadas en este trabajo, se logró obtener una Puntuación F1 de 0.1678, siendo un valor bastante bajo, pues un valor cercano a 0 representa un mal rendimiento del modelo, en otras palabras, la precisión y la exhaustividad tienen valores por debajo de lo aceptable, mientras que un valor cercano a 1 definiría un valor alto de exhaustividad y precisión logrando una relación casi armónica.

$$F1 = 2 \cdot \frac{Precisión \cdot Sensibilidad}{Precisión+Sensibilidad} \tag{3}$$

De estos resultados, se construyó una matriz de confusión que muestra la distribución de los Verdaderos Positivos (TP), Verdaderos Negativos (TN), Falsos Positivos (FP) y Falsos Negativos (FN), como se muestra en la figura 12. Esta matriz fue construida clasificando los resultados obtenidos en sus respectivas etiquetas (Verdaderos Positivos, Verdaderos Negativos, Falsos Positivos, Falsos Negativos) y posteriormente se indicaron los valores en los cuatro cuadrantes. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

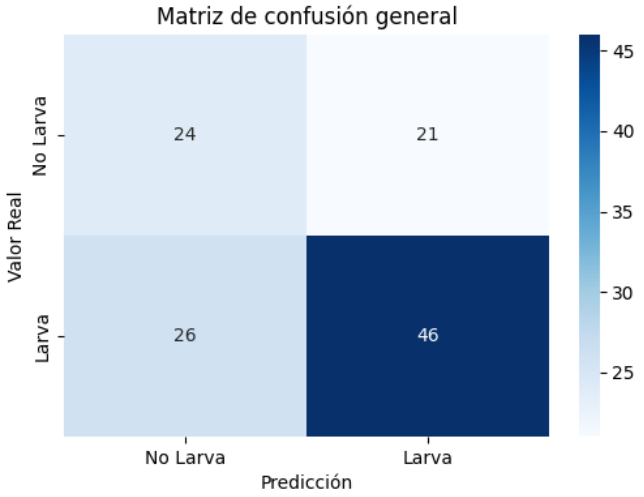


Figura 12. Matriz de confusión general.

Tabla 3. Resultados para matriz de confusión

Característica	Cantidad
TP	46
TN	26
FN	21
FP	24

4. Conclusiones

En este proyecto se implementó la técnica de segmentación *Region Growing* para la identificación de larvas de insecto en imágenes capturadas en invernaderos. Aunque el enfoque mostró resultados prometedores en ciertas condiciones controladas, su desempeño general fue limitado en cuanto a eficiencia y precisión, especialmente cuando las imágenes presentaban variaciones en iluminación, ruido o superposición de objetos. Estos factores redujeron significativamente la efectividad de la técnica para segmentar de manera confiable las larvas, lo que sugiere que *Region Growing* no es adecuado para aplicaciones donde se requiere una alta precisión y consistencia.

En consecuencia, se concluye que es necesario recurrir a técnicas más avanzadas de procesamiento de imágenes, como el uso de redes neuronales profundas, que han demostrado un mayor potencial en tareas de segmentación y clasificación de objetos complejos como en los casos del trabajo reportado en el trabajo presentado por Tuda y Luna-Maldonado en [8], donde se centran en el uso de técnicas de aprendizaje profundo, específicamente redes neuronales, para la clasificación de especies y sexo de escarabajos plaga. Otro de los antecedentes que describen el uso de aprendizaje automático en sistemas de visión se reporta por Ren, et.al. en [9], donde se introduce Faster R-CNN, un enfoque que logra un equilibrio entre precisión y velocidad en la detección de objetos utilizando regiones de interés generadas automáticamente. La implementación de estos enfoques, combinados con el aprendizaje automático, podría mejorar significativamente la precisión y la eficiencia del sistema de identificación de larvas, permitiendo su aplicación en condiciones reales con una mayor robustez y adaptabilidad.

Además, se sugiere explorar otras técnicas modernas de procesamiento de imágenes, como los métodos de aprendizaje profundo basados en segmentación semántica o la segmentación basada en contornos activos, que pueden adaptarse mejor a las características morfológicas de las larvas en diferentes entornos. Estas técnicas permiten un análisis más detallado y personalizado, ajustándose

dinámicamente a las variaciones presentes en los datos, lo que las hace más adecuadas para su uso en aplicaciones agrícolas donde las condiciones ambientales pueden cambiar constantemente.

Finalmente, este estudio pone en evidencia la necesidad de avanzar hacia soluciones más complejas y automatizadas que no solo mejoren la detección y clasificación de larvas, sino que también faciliten la toma de decisiones en tiempo real. La combinación de estas técnicas avanzadas con sensores y sistemas de visión computarizada podría proporcionar herramientas eficientes para monitorear y controlar plagas en cultivos, contribuyendo de manera significativa a la agricultura de precisión y sostenible.

Adicionalmente, el sistema se implementará en un entorno controlado para realizar pruebas y ajustes. Se medirá la precisión del sistema en la detección y conteo de larvas, lo que permitirá evaluar su rendimiento para la propuesta de mejoras. Se considerarán factores como la velocidad de procesamiento, la facilidad de uso, y la integración con otros sistemas de gestión de invernaderos.

En conclusión, la investigación sobre el uso de sistemas de visión para la identificación y conteo de insectos plaga en cultivos es fundamental para enfrentar los desafíos actuales y futuros en la agricultura. Este enfoque no solo tiene el potencial de transformar el manejo de plagas, haciéndolo más eficiente y sostenible, sino que también representa un paso adelante hacia una agricultura inteligente y respetuosa con el medio ambiente y la sociedad.

Referencias

[1] AGROASEMEX. (12 de Abril de 2019). Sitio Oficial de AGROASEMEX. Obtenido de https://www.gob.mx/agroasemex/articulos/las-plagas-producen-perdidas-de-hasta-un-40-por-ciento-en-la-produccion-agricola-revela-estudio-de-la-fao

[2] John L. Capinera. Integrated Pest Management: Current Concepts and Ecological Perspective. Florida Entomologist. 97(3), 1272, 2014

[3] Pimentel, D., & Peshin, R. *Integrated pest management: pesticide problems*, Springer Science & Business Media, (Vol. 3), 2014.

[4] Radcliffe, E. B., Hutchison, W. D., & Cancelado, R. E. Integrated pest management: concepts, tactics, strategies and case studies. Cambridge University Press, 2009.

[5] Elliott, N. C., Farrell, J. A., Gutierrez, A. P., van Lenteren, J. C., Walton, M. P., & Wratten, S. .*Integrated pest management*. Springer Science & Business Media, 1995.

[6] Howse, J. OpenCV computer vision with python (Vol. 27). Birmingham, UK: Packt Publishing, 2013.

[7] Huang, Z., Wang, X., Wang, J., Liu, W., & Wang, J. Weakly-supervised semantic segmentation network with deep seeded region growing. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 7014-7023), 2018.

[8] Tuda, M., & Luna-Maldonado, A. I. Image-based insect species and gender classification by trained supervised machine learning algorithms. Ecological Informatics. 60, 101135, 2020.

[9] Ren, S., He, K., Girshick, R., & Sun, J. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. Advances in neural information processing systems, 28, 91-99, 2015.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 32, pp. 467 - 481.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Evaluación de Algoritmos de Predicción Aplicados en el Análisis de Temperaturas de un Cultivo de Lechuga en Invernadero

Figueroa Martínez Armando[1], Martínez Nolasco Coral[1], Martínez Nolasco Juan José[1] Santoyo Mora Mauro[1] y Erazo Barradas Mauricio[2].
Tecnológico Nacional de México en Celaya, Guanajuato, México[1]
Tarleton State University, Stephenville, Texas, USA[2]
armandofigmtz@gmail.com (corresponding author)

Resumen

La presente investigación propone una metodología que evalúa dos métodos de predicción de las variables ambientales que influyen en el desarrollo de un cultivo de lechuga dentro de un invernadero hidropónico. Se monitorea la temperatura interna y humedad relativa de un invernadero, la temperatura y la humedad relativa en la Ciudad de Celaya. El registro de datos se realizó con la ayuda de instrumentos como: sensores de temperatura y humedad relativa y cámaras termográficas para calcular de manera no invasiva los valores de temperatura promedio de las lechugas en el invernadero. Dichos datos son analizados en forma básica para obtener una vista preliminar de relaciones. Posteriormente se presenta la comparativa entre dos métodos de regresión multivariable a través del lenguaje Python y librerías como scikit-learn, haciendo uso los datos recopilados, esto para finalmente obtener el desarrollo de modelos entrenados para predicción de temperatura de los cultivos en ubicaciones internas del invernadero para después compararlos a fin de elegir el de mejor coherencia con los datos. Los resultados muestran errores bajos en el caso de la regresión lineal múltiple, con valores de ECM y EAM cercanos a 2. En cambio, para la regresión mediante árboles de decisión mejora, los errores se concentran alrededor de 1. Esto proporciona una buena evaluación preliminar sobre el uso de estos algoritmos en este tipo de aplicaciones. Durante la captura de datos, se emplearon herramientas como sensores de temperatura y humedad relativa, así como cámaras termográficas, para obtener mediciones precisas de la temperatura de las lechugas en el invernadero.

Palabras clave: Árbol de decisiones, Cultivos, Predicción, Python, Regresión lineal, Temperatura.

Abstract

This research proposes a methodology that evaluates two prediction methods for environmental variables that influence the development of a lettuce crop within a hydroponic greenhouse. The internal temperature and relative humidity of the greenhouse, as well as the temperature and relative humidity in the city of Celaya, are monitored. Data was collected using instruments such as temperature-relative humidity sensors, and thermal cameras to non-invasively calculate the average temperature of the lettuces in the greenhouse. This data is initially analyzed in a basic manner to provide a preliminary view of relationships. Subsequently, a comparison between two multivariable regression methods is presented using Python and libraries like scikit-learn, based on the collected data. This is done to develop trained models for predicting crop temperature in internal locations within the greenhouse, and later compare them to select the one that best aligns with the data. The results show low errors in the case of multiple linear regression, with RSME and MAE values close to 2. In contrast, regression using decision trees improves, with errors concentrating around 1. This provides a good preliminary evaluation of the use of these algorithms in such applications. During data collection, tools such as temperature and relative humidity sensors, as well as thermal cameras, were used to obtain precise measurements of the temperature of the lettuces in the greenhouse.

Palabras clave: Crops, Decision tree, Linear regression, Prediction, Python and Temperature.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 32, pp. 467 - 481.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

1. Introducción

Para mediados del siglo XXI, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) estima que la población humana alcanzará los 9.73 mil millones de personas, y la mayor parte de esta población vivirá en áreas urbanas, ya que se calcula que al menos dos terceras partes se desplazarán a las ciudades. Las manchas urbanas continuarán expandiéndose, y estos cambios demográficos traerán consecuencias en diferentes sectores de la industria y la vida humana. En la industria alimentaria, surgirán nuevas problemáticas como una mayor demanda de combustibles y un aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, sumado al hecho de que cada día hay más áreas de cultivo en riesgo debido al cambio climático y desastres naturales [1]. Esto ha exigido la generación de medidas para contrarrestar estas dificultades, como el concepto de agricultura protegida, que puede crear un entorno de cultivo amigable y posicionarse dentro de las zonas urbanas. Además, la agricultura protegida permite una disminución en la pérdida de rendimiento resultante de climas extremos, ofrece protección contra plagas y mejora el uso de los distintos recursos [2].

La agricultura protegida ha evolucionado hacia lo que hoy se conoce como agricultura de ambiente controlado. Esta evolución se da cuando se ejercen acciones más específicas y detalladas sobre el microclima o el cultivo. Aunque el término "agricultura de ambiente controlado" fue acuñado en la década de los 60, ha ganado impulso recientemente gracias a tecnologías como el IoT, que facilitan la integración de sensores y mediciones de manera remota y con baja latencia. En resumen, la agricultura de ambiente controlado se define como aquella que emplea un enfoque intensivo para controlar el crecimiento y desarrollo de las plantas a través de técnicas hortícolas avanzadas y tecnología [3].

Sin embargo, no todos los cultivos son aptos para ser cosechados mediante agricultura protegida, ya sea por las condiciones de su crecimiento, tamaño o necesidades propias de la planta. Entre los cultivos que han mostrado ser particularmente adecuados para la agricultura de ambiente controlado y protegida se encuentra la lechuga. Este vegetal es especialmente relevante, ya que México es uno de los principales exportadores de lechuga a Estados Unidos. En 2019, se alcanzaron 541 kilómetros cuadrados de cultivos de agricultura protegida en México, lo que indica una tendencia de crecimiento significativa en ambos frentes. Esta combinación de factores representa un área de oportunidad considerable a explotar en los años venideros [4]. Para maximizar estas oportunidades y enfrentar los desafíos mencionados, la tecnología en la agricultura protegida y de ambiente controlado ha evolucionado. Esta evolución ha implicado un mejor control de variables, mayor conocimiento del comportamiento del sistema de cultivo y una tendencia hacia la conciencia ecológica, priorizando la reducción del consumo energético. Las investigaciones centradas en el cultivo de lechugas han adoptado un enfoque orientado en infraestructuras de dispositivos embebidos y sensores para el monitoreo y control de las variables[5].

Los estudios realizados mediante esta metodología han permitido observar que los efectos de las variables son diversos según el cultivo. Este trabajo, se centra específicamente en la lechuga, donde los estudios han demostrado que dos variables afectan principalmente su crecimiento: la iluminación y la temperatura. La temperatura resulta ser un factor crítico, ya que influye en casi todos los aspectos morfológicos de la lechuga, desde el ancho de las hojas, el área foliar, el peso seco, entre otros [6]. Por las razones anteriores recientemente se han integrado a las infraestructuras y dispositivos de medición tecnologías existentes herramientas como los algoritmos inteligentes y métodos basados en herramientas matemáticas para lograr una mejor eficiencia a la vez que se busca una reducción de riesgos para los cultivos. La importancia de englobar este tipo de herramientas en los cultivos es generalmente la predicción de temperaturas y entendimiento de relaciones entre factores así se genera la posibilidad de anteponerse a condiciones críticas en los invernaderos [7].

En este trabajo es un análisis y aplicación inicial de algoritmos de regresión usando variables ambientales y temperaturas en cultivos de lechuga de un invernadero ubicado en la ciudad de Celaya Guanajuato, con la finalidad de evaluar dos métodos y seleccionar el más adecuado para la predicción de temperaturas de cultivos de lechuga en invernadero. El aporte del trabajo es proponer la aplicación de métodos de regresión múltiple básica a la vez que se ejemplifica el proceso de preanálisis de datos

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 32, pp. 467 - 481.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

para la aplicación de los modelos. Cabe resaltar que un aporte es la predicción teniendo como objetivo temperaturas referentes a los cultivos y no centrarse en el análisis de condiciones climáticas del invernadero [8]. Además, se exploran métodos distintos para la predicción de temperatura en específico el árbol de decisiones para regresión ya que otros autores proponen otras técnicas como modelos de auto regresión y máquinas de vectores de soporte, no obstante, también se explora un método típico como lo es la regresión lineal múltiple [9]. Es importante resaltar que tener estimaciones de diversos factores mediante sistemas entrenados o modelos permite la reducción de tiempo y en ocasiones la infraestructura necesaria para el monitoreo.

Los objetivos de esta investigación son: 1) Monitorear las variables internas de un invernadero: temperatura ambiente, la temperatura de las plantas, humedad relativa y las variables externas: temperatura ambiente y humedad relativa, 2) Analizar y procesar los datos recabados de las variables y determinar la relación entre ellas, 3), Evaluación de algoritmos de modelos de predicción de variables ambientales 4) Selección del algoritmo óptimo para la predicción de variables ambientales dentro de un invernadero.

2. Metodología

El proceso de evaluación de métodos de predicción de temperatura se divide en tres etapas principales: A) Registro y Captura de variables, B) Análisis y preprocesamiento de datos, y C) Selección y evaluación de algoritmos/modelos de predicción. Cada una de estas etapas se aborda de manera independiente y de forma secuencial. La figura 1 muestra un resumen de la metodología desarrollada, a continuación, se describen cada una de las fases:

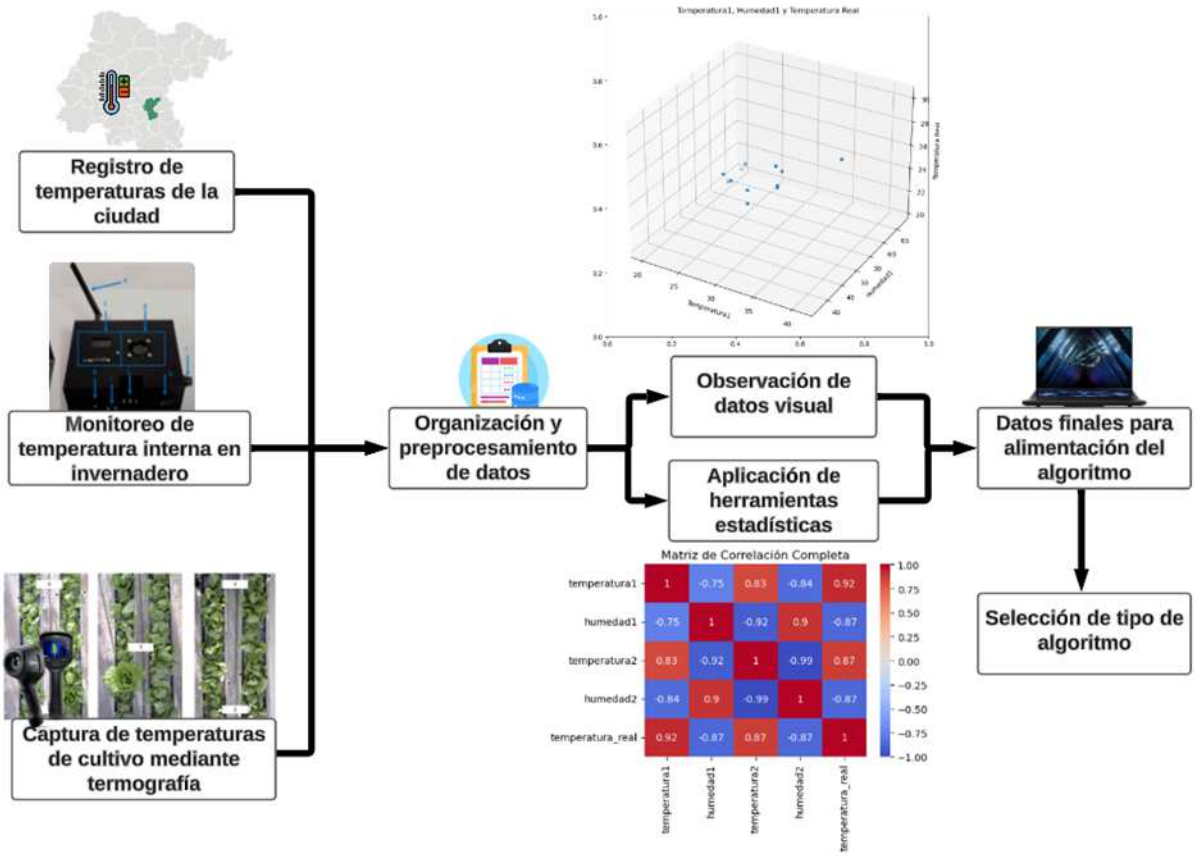


Figura 1. Representación de la metodología.

2.1 Proceso de registro y captura de datos

El primer paso de la metodología consiste en definir las variables ambientales que influyen directamente en la temperatura del cultivo de lechugas, debido a que las lechugas están en un espacio protegido se verán afectadas por la temperatura ambiente y humedad relativa del invernadero, estas dos variables son dependientes de las temperaturas y humedad relativa generales de la ciudad o exteriores [10]. Las variables de entrada fueron recabadas de diversas formas, como se observa en la Tabla 1. La consulta web fue realizada en la página Weather Spark mientras que las variables internas del invernadero fueron capturadas con una unidad MWSn (Sensor inalámbrico modular multipropósito) [11].

Tabla 1. Variables consideradas de entrada.

Variable	Método de captura
Temperatura externa promedio	Consulta web
Humedad relativa exterior	Consulta Web
Temperatura interna promedio	Estación meteorológica y MWSn
Humedad relativa interior	Estación meteorológica y MWSn

Las horas de interés en el registro y captura de datos para la presente investigación correspondió con el fotoperiodo de la ciudad de Celaya, Gto. en el intervalo de 7:00 a 18:00 hrs., el comportamiento de las temperaturas durante el día se muestra en la Figura 2, resaltando que la temperatura máxima fue de 27 °C a las 15:45 hrs.

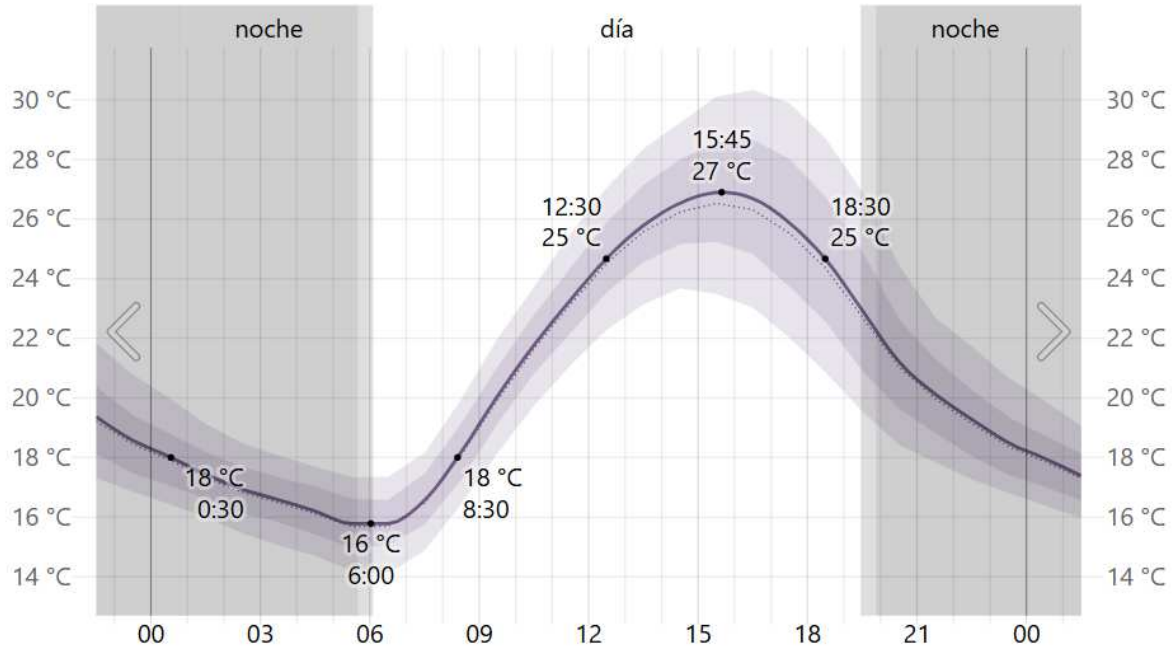


Figura 2. Temperaturas en Celaya en un día de verano.

Para las variables de salida se seleccionaron 5 posiciones dentro del invernadero, cuatro hacia las esquinas y una en la parte central, para cada una de las posiciones se capturaron temperaturas de 4 lechugas utilizando la cámara termográfica FLIR E45. La Figura 3 es una imagen representativa de

las ubicaciones mencionadas y el proceso de registro y captura de temperaturas, después en cada posición se calcula un promedio por hora con las 4 lechugas muestreadas.

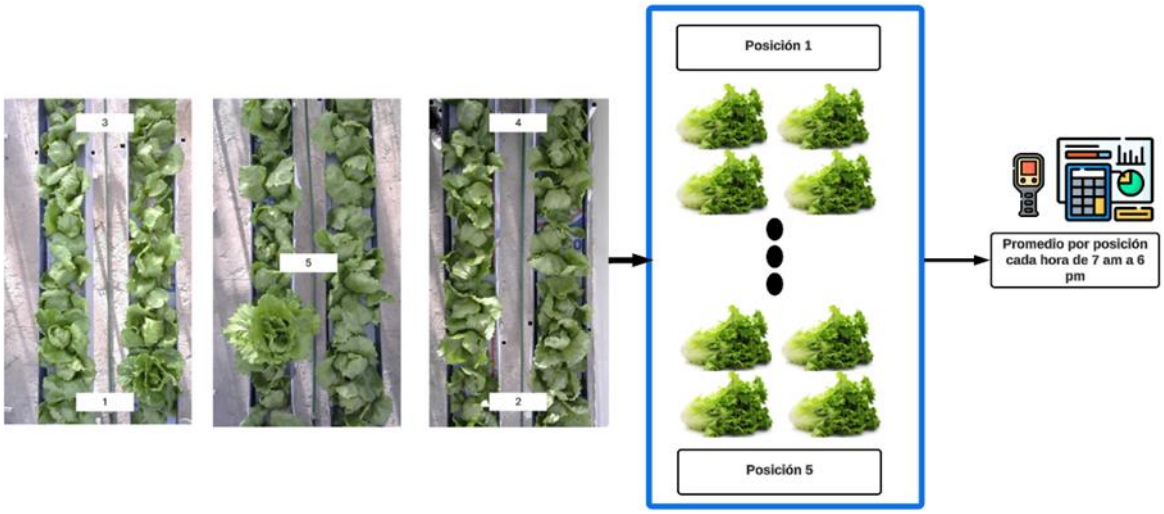


Figura 3. Representación de captura de temperatura de cultivo.

2.2 Análisis y preprocesamiento de datos

Una vez se obtienen los datos de las diversas variables se realizó un preprocesamiento de datos, según sea el caso de cada una de las variables, por otra parte, también es indispensable definir las variables de entrada que son temperaturas y humedades relativas externas e internas del invernadero un mientras que las variables de salida serán las temperaturas de cultivos en distintas posiciones. Definidas las variables se realiza un acercamiento básico a los datos. La Figura 4 muestra un diagrama que resume algunos de los procesos necesarios para cada uno de los datos registrados/capturados.

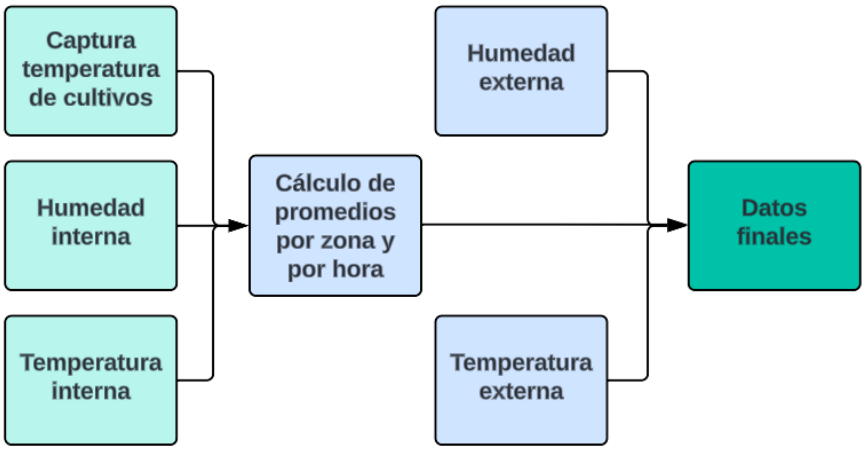


Figura 4. Proceso de preprocesamiento de datos.

En el proceso de análisis de los datos se usaron distintas herramientas visuales que relacionan dos o más variables. La tabla 2 engloba algunas de las herramientas empleadas en el proceso y aplicación. La mayor parte de las variables fueron gráficos soportados en librerías de Python y a través de la herramienta Jupyter Notebook mientras que la parte estadística en esta fase consistió en el uso de histogramas, matriz y coeficientes de correlación.

Tabla 2. Herramientas utilizadas y su tipo.

Herramienta	Aplicación
Gráficos 2D	Análisis/Visual
Gráficos 3D	Análisis/Visual
Matriz correlacional	Visual/estadístico
Coeficiente de correlación	Estadístico
Histogramas	Estadístico

Algunas observaciones procedentes del proceso de análisis de los datos fueron: conforme disminuyen las temperaturas, tanto internas como externas en el invernadero, las temperaturas de los cultivos también se reducen. Además, se observa que, aunque en los cultivos aumentan su temperatura en respuesta a temperaturas internas o externas más altas, esta relación presenta una mayor variabilidad y tiende a alcanzar un estado de saturación. Con relación a la humedad relativa se muestra que un aumento en ella se refleja como una disminución de la temperatura en los cultivos. En cuanto a los gráficos que involucran 3 variables pueden verse reflejadas tendencias donde los datos se agrupan y patrones marcados en algunos casos. La Figura 5 muestra el gráfico representativo de temperatura en la posición 1 contra variables de entrada del modelo la cual muestra algunas de las características comentadas entre la relación de variables.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 32, pp. 467 - 481.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

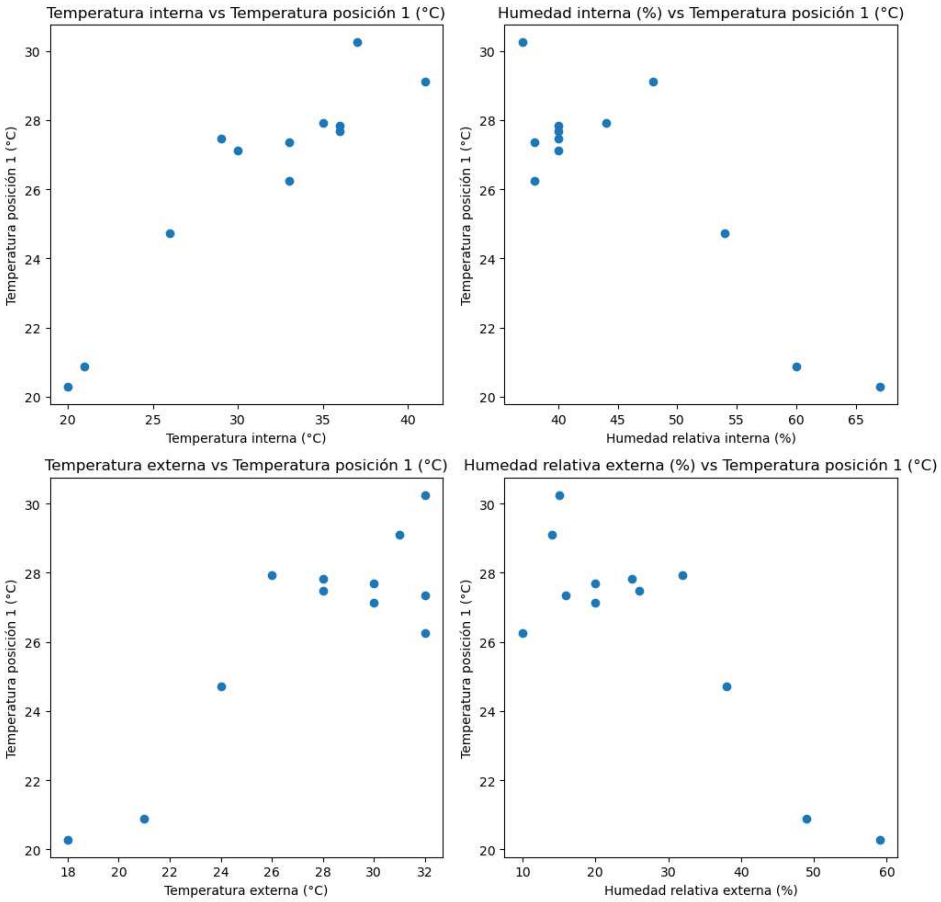


Figura 5. Gráficos representativos 2D utilizados.

Los gráficos 3D permiten una visualización más fiable en cuanto a las relaciones multivariable se refiere para este caso fueron 2 tipos de gráficos, gráficos 3D y también gráficos 2D combinados con escalas de color como su puede observar en la Figura 6.

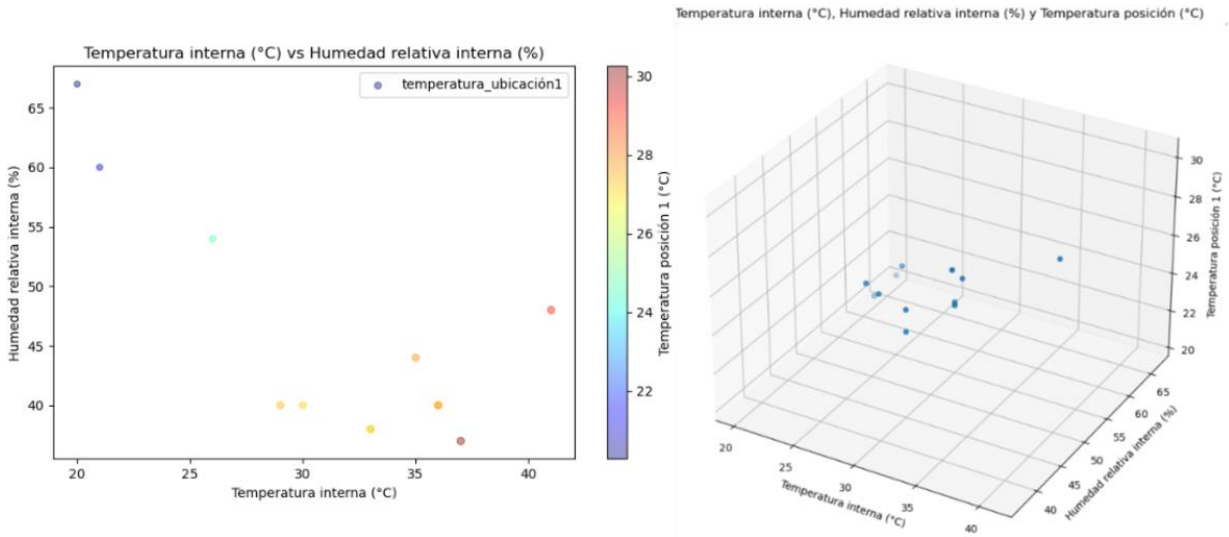


Figura 6. Gráficos de 3 variables utilizados.

En cuanto a la parte estadística, una herramienta gráfico-estadística usada fue una matriz de correlación con ella puede observarse de forma visual que variables tienen una relación más fuerte entre ellas, la matriz para una posición de ejemplo se muestra en la Figura 7. En ella se puede observar que la mayoría de las variables están altamente correlacionadas, al arrojar valores cercanos al 1 por ello se decidió incluir todas las variables como entradas. Para el caso de estudio las variables de interés serán las temperaturas de las lechugas en las distintas posiciones.

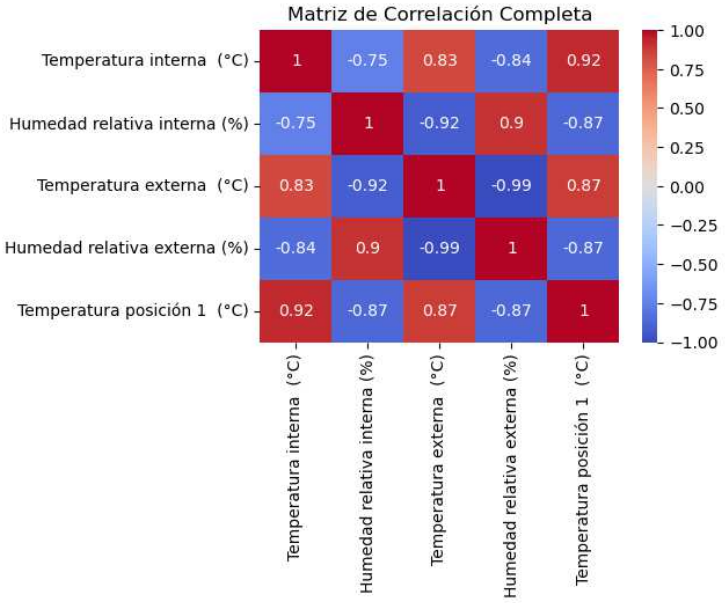


Figura 7. Matriz de correlación completa posición 1.

Algunos otros métodos de filtrado de datos se usaron corroborándose que la mayoría de las variables mantenían una relación lineal con la variable objetivo mientras que la correlación de Kendall y el método de información mutua hacían notar que la importancia de las variables internas es más significativa que las exteriores, pero no debe olvidarse que las variables internas son dependientes de las exteriores. Lo anterior se muestra representado para la posición 1 en la Figura 8.

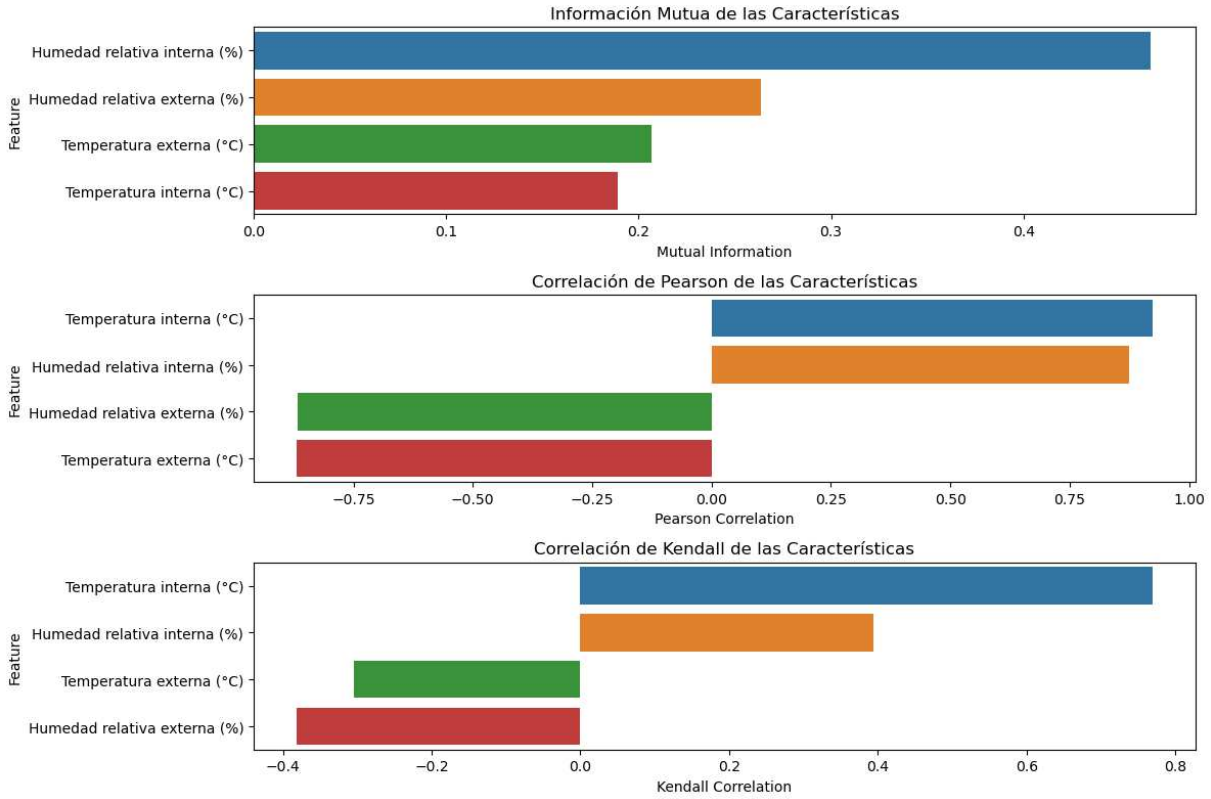


Figura 8. Resultados de métodos de filtrado de datos.

La última etapa del preprocesamiento de datos es la consideración de variables compuestas para posteriormente ser evaluadas a través de la correlación de Pearson, se corroboró que la relación lineal entre variables base y salidas era óptima. La Figura 8 muestra que las relaciones entre humedad relativa interior y la temperatura ambiente están altamente correlacionadas con las temperaturas del cultivo, por esta razón se incluirán como variables compuestas de entrada.

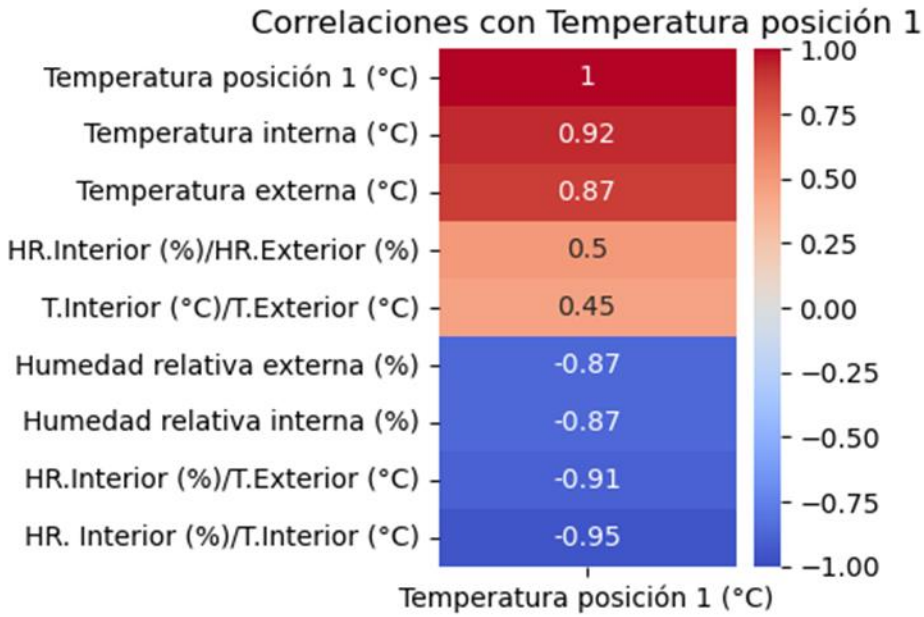


Figura 9. Resultados de correlación con Temperaturas en la posición 1.

2.3 Selección de algoritmos

Se seleccionó el algoritmo de acuerdo con el enfoque de la aplicación y tecnología. Se contemplaron la inteligencia artificial, Machine Learning y Deep Learning. Se decidió por el Machine Learning debido al preprocesamiento y extracción de características de forma manual y a que tampoco se considera la intención de imitar alguna característica humana, de forma que no se logra entrar en la capa de inteligencia artificial como se muestra en la Figura 10 [12].

Tabla 3. Análisis comparativo de tecnologías para la selección de algoritmos.

Herramienta	Descripción	Motivo de exclusión
Inteligencia Artificial (IA)	Campo general que busca emular características humanas en máquinas.	No se busca la imitación de características humanas en este proyecto.
Machine Learning (ML)	Algoritmos que aprenden de datos con preprocesamiento manual.	Seleccionado debido al uso de preprocesamiento y extracción de características manuales.
Deep Learning (DL)	Subcampo de ML que usa redes neuronales profundas para el aprendizaje automático de características.	Excluido por no requerir extracción automática de características complejas.

Existen diversas subdivisiones en el Machine Learning, la clasificación se basa en la forma de aprendizaje, ver Figura 11, se seleccionó el área de aprendizaje supervisado dado que el objetivo es la predicción y se consideran datos estructurados y cuantitativos. Finalmente es una problemática de regresión y no de clasificación.

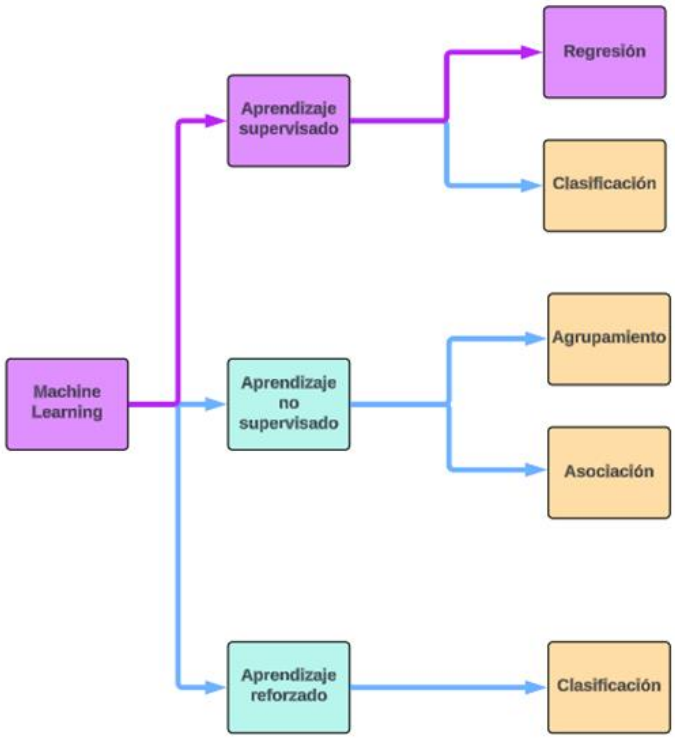


Figura 11. Clasificación de ML.

Al considerar que es un proceso en el cual se insertarán valores cuantitativos y se espera en base a ello recibir valores de la misma naturaleza se emplea un proceso de regresión, dos de algoritmos más básicos y simples para esta tarea son la regresión lineal múltiple y la regresión por árboles de decisión, que utiliza un modelo como se muestra en la ecuación 1. La regresión lineal múltiple se representa por la ecuación 1 donde y es la variable objetivo, $\beta_0, \beta_1 \ldots \beta_n$ son los coeficientes predictores y $x_1, x_2 \ldots . x_n$ las variables predictoras.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \cdots + \beta_n x_n \quad (1)$$

El método de regresión lineal múltiple a través de árboles de decisión suele representarse comúnmente mediante gráficos como se muestra en la Figura 12, puede observarse que diversos umbrales son definidos y basado en esto el modelo puede llegar finalmente a un valor de predicción, también es visible que en ocasiones ciertos valores recortan el proceso de decisiones a una menor cantidad generalmente puede deducirse que este modelo se adapta mejor a relaciones no lineales de ahí su selección para la comparación con el método de regresión lineal y de esta manera comparar dos metodologías de diferente naturaleza pero similares en simpleza.

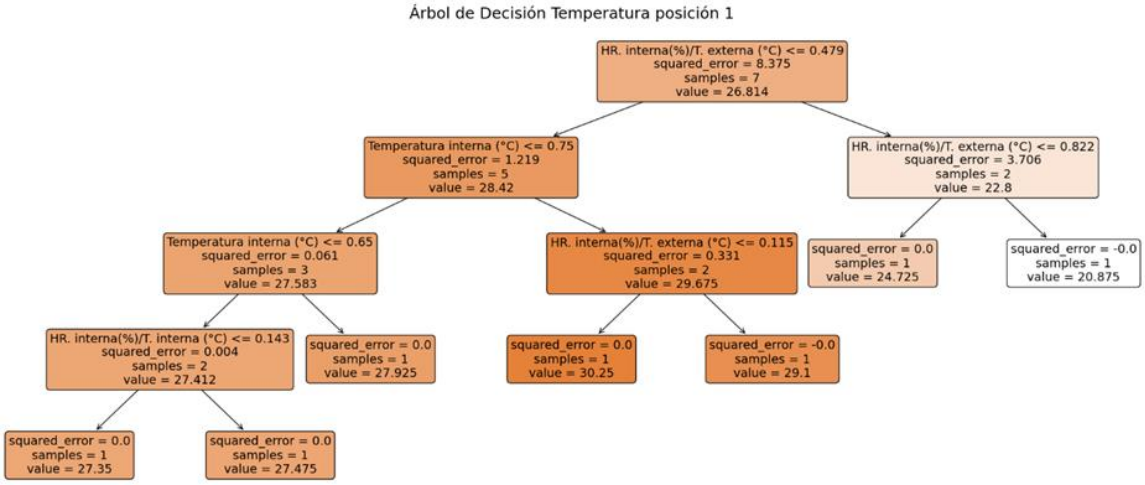


Figura 12. Gráfico de regresión por árbol de decisiones.

3. Entrenamiento y prueba de algoritmos

En el entrenamiento y prueba de los algoritmos se sigue una metodología similar, el lenguaje usado para el proceso es Python debido a su facilidad de uso y versatilidad, la librería seleccionada para la generación de los modelos y aplicación es scikit-learn, es la librería de mayor uso en Machine Learning en Python. La Figura 13 muestra el proceso general de entrenamiento y prueba de algoritmos. Es importante el uso de algoritmos genéticos mediante DEAP en Python para la selección de un valor semilla adecuado en la división de datos de entrenamiento y prueba. Se destaca que la división de los datos consta de 60% para entrenamiento y 40% para prueba.

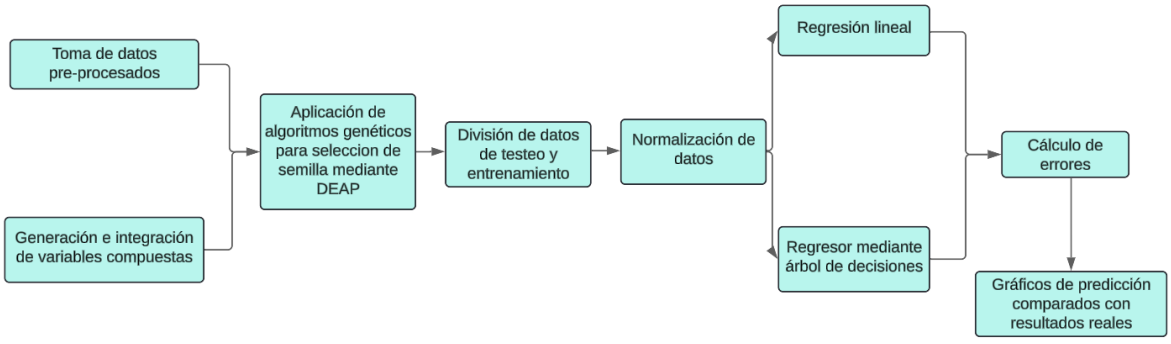


Figura 13. Proceso general de entrenamiento y prueba de algoritmos.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 32, pp. 467 - 481.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

De forma representativa del proceso de la regresión lineal se describen los resultados de la posición 1, en este caso se obtuvo la ecuación 2 la cual muestra la salida "y" la cual representa la temperatura esperada en el cultivo en la posición mientras que posee las variables independientes de entrenamiento con sus respectivos coeficientes predictores. En total se obtuvieron 5 ecuaciones una para cada posición dentro del invernadero.

$$y = 3.0698 + (1.5730 * temperatura\ interna) + (6.7407 * humedad\ relativa\ interna) + (22.4069 * temperatura\ externa) + (23.8611 * humedad\ relativa\ externa) + (-11.1096 * H.interna/T.interna) + (-2.2870 * H.interna/T.externa) \quad (2)$$

Los gráficos obtenidos para cada una de las posiciones mediante el proceso de regresión lineal se ejemplifican en la Figura 14, en estos se puede visualizar la comparativa entre valores esperados y las predicciones a la vez que se comparan con las variables base de entrenamiento, también se obtuvieron las métricas de Error Cuadrático Medio (ECM) y Error Absoluto Medio (EAM) que para el caso de la posición 1 fueron 1.17 y 1.11 respectivamente aplicando regresión lineal.

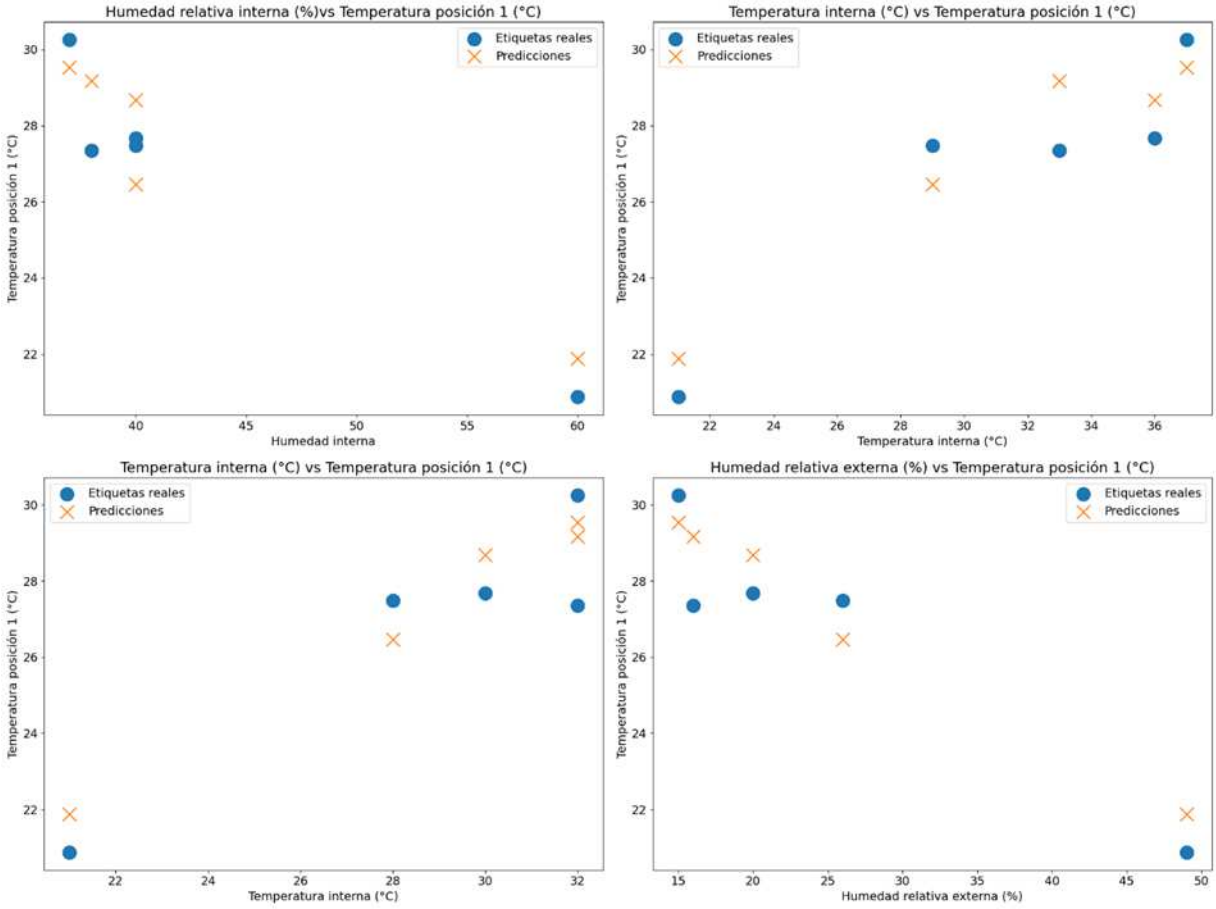


Figura 14. Gráficos obtenidos de regresión lineal para posición 1.

En el caso de la regresión mediante árboles de decisiones tras el entrenamiento del modelo se obtiene el gráfico descriptivo para la posición 1 en los cultivos dentro del invernadero, ver Figura 15, las métricas de error cuadrático medio y error absoluto medio fueron 0.59 y 0.48 respectivamente mediante este método.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 32, pp. 467 - 481.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

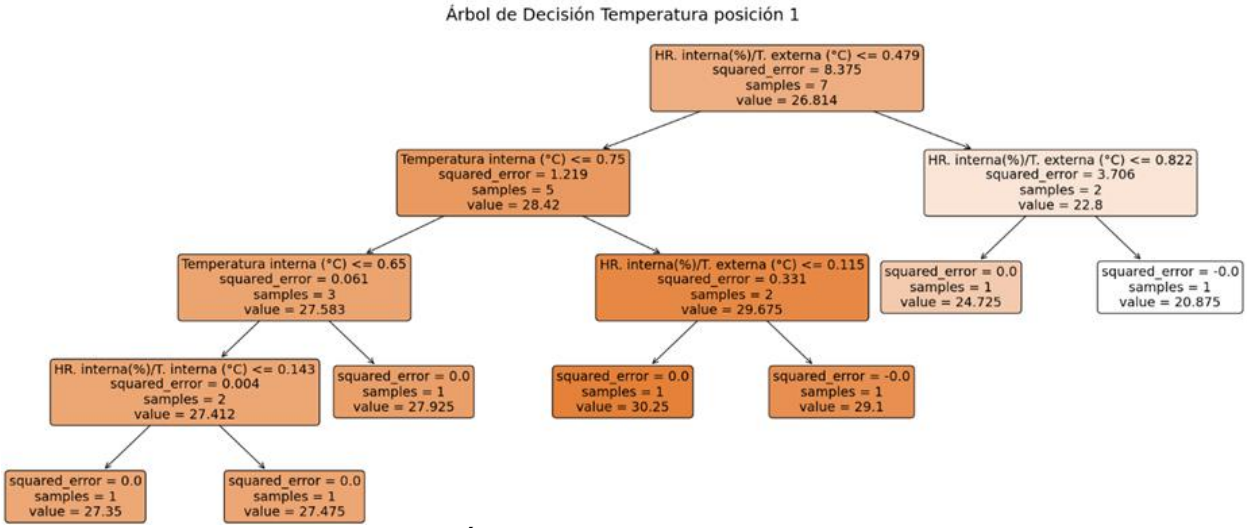


Figura 15. Árbol de decisión para la posición 1.

Los gráficos 2D también muestran la comparativa en el caso de la regresión mediante árbol de decisiones en contraste con las diferentes variables, en ellos se puede observar el mejor acercamiento entre datos esperados y predicciones que reflejan los errores calculados.

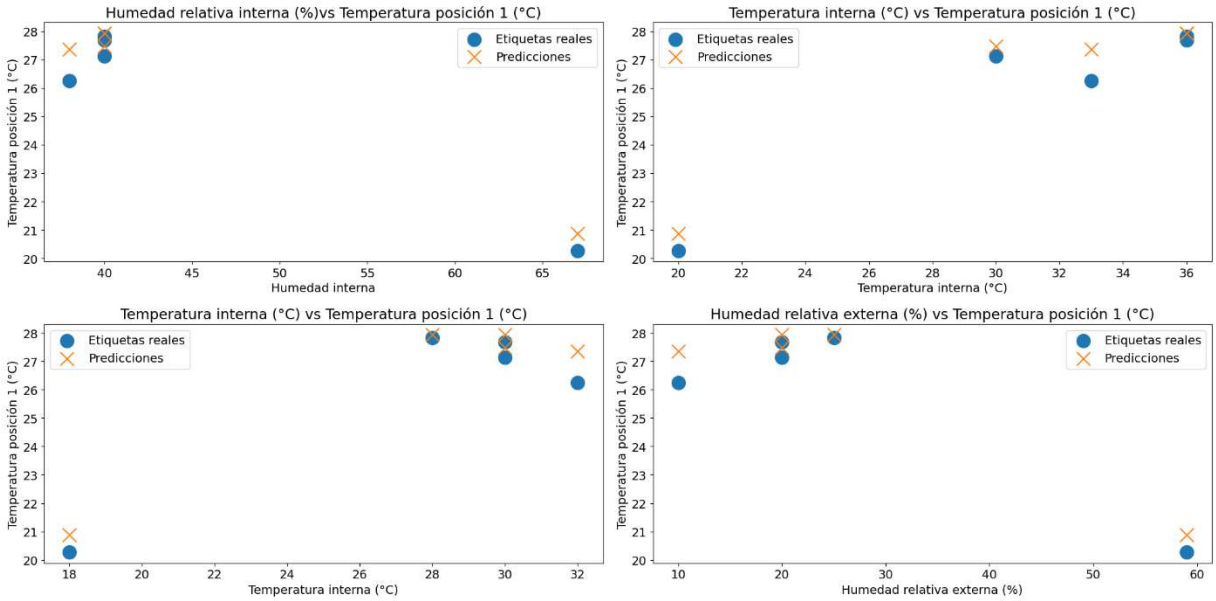


Figura 16. Resultados de predicciones posición 1 mediante árboles de decisiones.

4. Resultados

La manera de comparar los dos algoritmos en cuestión es mediante los errores cuadrático medio y absoluto, los resultados de la regresión lineal se muestran en la Tabla 3. Se puede observar que los errores cuadráticos y absolutos se mantienen debajo de 3, también es visible la variación de la semilla en cada una de las ubicaciones ejerce una influencia los resultados obtenidos ya que cada una de las ubicaciones posee una semilla de valor distinto.

Tabla 4. Resumen de resultados de regresión lineal.

No. de posición	Valor de semilla	ECM	EAM
1	431	1.17	1.11
2	71	2.61	2.19
3	313	2.69	2.53
4	458	2.87	2.28
5	715	2.27	1.92

Por otro lado, los resultados del uso de árboles de decisiones en la regresión se muestran en la Tabla 4, puede concluirse que son más cercanos a los valores reales dado que los errores cuadráticos y absoluto muestran valores en el rango de 1, es notorio que las diversas semillas utilizadas tampoco siguen un patrón por ello el uso de DEAP librería de Python que permite la integración de los algoritmos genéticos de forma rápida y sencilla es de gran utilidad.

Tabla 5. Resumen de resultados de regresión por árbol de decisión.

No. de posición	Valor de semilla	ECM	EAM
1	16	0.59	0.48
2	891	0.78	0.65
3	858	1.12	1.02
4	212	0.76	0.59
5	314	0.86	0.76

5. Conclusiones

El desarrollo de esta investigación ha logrado abrir un amplio abanico de posibilidades en el monitoreo de variables internas y externas de un invernadero para lechugas hidropónicas, particularmente en relación con las condiciones climáticas y las características específicas de los cultivos, como la temperatura. Se lograron establecer indicios claros de la relación entre las variables climatológicas externas y las variables objetivo, es decir, las temperaturas de los cultivos de lechuga hidropónica en posiciones específicas dentro del invernadero. Cabe destacar que se exploró la posibilidad de cuantificar y jerarquizar estas relaciones, lo que abre el camino para un análisis más profundo y detallado en futuros estudios considerándose esto un aporte a un proyecto para un gemelo digital de invernadero que se trabaja por parte de los autores.

Los objetivos planteados, como el monitoreo de variables clave (temperatura ambiente, temperatura de las plantas, humedad relativa, tanto interna como externa), y el análisis de los datos recopilados, permitieron determinar correlaciones entre las variables monitoreadas. Además, se llevó a cabo una evaluación exhaustiva de algoritmos de modelos de predicción para identificar aquellos que mejor se adaptan a la naturaleza de los datos obtenidos. Los resultados sugieren que la regresión mediante árboles de decisión se destacó como el método más adecuado sobre la regresión lineal múltiple, debido a la naturaleza no lineal de las relaciones observadas entre las condiciones climáticas y el comportamiento de los cultivos.

Finalmente, se pudo concluir que la selección de un algoritmo óptimo para la predicción de variables ambientales dentro de un invernadero es factible y puede mejorar significativamente la capacidad de gestión y control de los cultivos. El uso de machine learning para este propósito no solo facilita la predicción precisa de variables clave como la temperatura, sino que también permite una mejor toma de decisiones al gestionar las condiciones climáticas internas del invernadero, lo que podría

resultar en un impacto positivo en la producción agrícola en entornos controlados disminuyendo por otro lado la cantidad de infraestructura permanente requerida para un monitoreo de las temperaturas de cultivos.

Referencias

[1] A. J. Hati and R. R. Singh, “Smart Indoor Farms: Leveraging Technological Advancements to Power a Sustainable Agricultural Revolution,” Dec. 01, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/agriengineering3040047.

[2] P. A. Liao, J. Y. Liu, L. C. Sun, and H. H. Chang, “Can the adoption of protected cultivation facilities affect farm sustainability,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 23, pp. 1–17, Dec. 2020, doi: 10.3390/su12239970.

[3] C. Gómez *et al.*, “Controlled environment food production for urban agriculture,” 2019, *American Society for Horticultural Science*. doi: 10.21273/HORTSCI14073-19.

[4] University of Florida, “IFAS Extension University of Florida,” Protected agriculture in México. Accessed: Jul. 20, 2024. [Online]. Available: https://edis.ifas.ufl.edu/publication/FE1124

[5] H. Pendyala, G. Kumar Rodda, A. Mamidi, M. Vangala, S. Bonala, and K. K. Korlapati, “IoT Based Smart Agriculture Monitoring System”, [Online]. Available: www.ijser.in

[6] Y. Kong, J. Masabni, and G. Niu, “Temperature and Light Spectrum Differently Affect Growth, Morphology, and Leaf Mineral Content of Two Indoor-Grown Leafy Vegetables,” *Horticulturae*, vol. 9, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/horticulturae9030331.

[7] E. Bolandnazar, H. Sadrnia, A. Rohani, F. Marinello, and M. Taki, “Application of Artificial Intelligence for Modeling the Internal Environment Condition of Polyethylene Greenhouses,” *Agriculture (Switzerland)*, vol. 13, no. 8, Aug. 2023, doi: 10.3390/agriculture13081583.

[8] F. García-Vázquez *et al.*, “Prediction of Internal Temperature in Greenhouses Using the Supervised Learning Techniques: Linear and Support Vector Regressions,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 14, Jul. 2023, doi: 10.3390/app13148531.

[9] H. U. Frausto, J. G. Pieters, and J. M. Deltour, “Modelling greenhouse temperature by means of auto regressive models,” *Biosyst Eng*, vol. 84, no. 2, pp. 147–157, Feb. 2003, doi: 10.1016/S1537-5110(02)00239-8.

[10] H. Li *et al.*, “Analysis of Heat and Humidity in Single-Slope Greenhouses with Natural Ventilation,” *Buildings*, vol. 13, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/buildings13030606.

[11] V. Sámano-Ortega, O. Arzate-Rivas, J. Martínez-Nolasco, J. Aguilera-Álvarez, C. Martínez-Nolasco, and M. Santoyo-Mora, “Multipurpose Modular Wireless Sensor for Remote Monitoring and IoT Applications,” *Sensors*, vol. 24, no. 4, Feb. 2024, doi: 10.3390/s24041277.

[12] M. Soori, B. Arezoo, and R. Dastres, “Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced robotics, a review,” Jan. 01, 2023, *KeAi Communications Co.* doi: 10.1016/j.cogr.2023.04.001.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 33, pp. 482 - 498.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Alarma de Colisión Posicional con Celdas de Carga, Mediante el Módulo SIM808

Granados Albarrán Karina, Castillo Ventura Héctor y Cedillo Reyes Brenda Vanessa

Instituto Tecnológico de México Campus Tláhuac
karina.granados@tlahuac.tecnm.mx

Resumen

El presente trabajo tiene como propósito hacer la calibración de dos celdas de carga para detectar la colisión de un automóvil o motocicleta, y enviar una notificación de alerta mediante un mensaje SMS y una llamada y las coordenadas del choque.

El sistema se compone de hardware y software, por el lado del hardware están presentes las celdas de carga que reciben una señal analógica a través de una magnitud física como lo es el peso o la presión, en este caso es la presión que se ejerce en el choque, se tiene un dispositivo intermediario que convierte la señal analógica recibida en señal digital con una resolución que permite ser interpretada con un reducido margen de error, del mismo modo se utilizó un módulo encargado de conectarse a la red celular para envió de mensajes y realización de llamadas, a su vez captar datos GPS mediante una antena integrada, por último el sistema cuenta con un microprocesador que dirige cada uno de los componentes además de mantener una secuencia entre los mismos

Palabras clave: Calibración, Celda, Alarma, Colisión, Alarma, Sistema.

1. Introducción

Las cifras de accidentes de tránsito aumentan cada día más según datos obtenidos de fuentes confiables como los son páginas de la OMS y el INEGI las cifras nos indican datos alarmantes de personas que fallecen y se encuentran desaparecidas o personas que pierden la vida por no contar con una asistencia médica oportuna. ¿Qué se puede hacer para disminuir estas cifras? si bien no se puede reducir el número de accidentes porque conlleva a una educación vial y de conciencia que deben tener los conductores, si se puede reducir las cifras de personas que pierden la vida, según estudios científicos indican que existe una hora de oro que nos indica que se puede salvar a la persona que se encuentre en riesgo.

La tecnología es la mejor aliada para el desarrollo de prototipos e instrumentos creando un sistema de seguridad pasiva que nos ayuda a reducir el riesgo al momento de una colisión de alto impacto, utilizando celdas de carga o también conocidas como sensores de peso para que al momento del impacto estos activan un indicador led el cual da pauta para comenzar la secuencia delimitada en el programa, la cual consiste en el envió de un mensaje de texto con un enlace que redirige a la plataforma Google maps, la ubicación en tiempo real se logra gracias a la obtención de coordenadas geográficas brindadas por el módulo SIM808 que mediante programación une el enlace de Google maps con las longitud y latitud para así obtener en un solo mensaje de texto una ubicación en tiempo real.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 33, pp. 482 - 498.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

El desarrollo de este proyecto busca tener un sistema que sea capaz de actuar ante una colisión para poder brindar ayuda oportuna a una víctima de un siniestro vial, de esta manera el sistema enviara una alerta median te mensaje de texto para que la persona afectada sea socorrida lo antes posible

El seguimiento a futuro de este sistema colaborara para reducir el número de personas lesionadas por un accidente automotriz además de auxiliar a las víctimas desaparecidas durante un accidente automovilístico.

2. Implementación de la alarma de colisión posicional

2.1 Cálculo del factor de calibración.

En este trabajo se utilizaron dos celdas de carga con una capacidad de 50kg, con un voltaje de salida de 0.1V, para el acondicionamiento de las celdas se utilizó la placa HX71. Esta placa es compatible con las celdas de carga de 1kg, 5kg, 20kg y 50kg. La tarjeta HX71U tiene un convertidor analógico-digital de 24 bits, permitiendo convertir la señal analógica de las celdas a una señal digital. La placa HX71U se comunica con el Arduino por medio de la comunicación I²C. El circuito del acoplamiento entre las celdas de carga la placa HX71U y el Arduino se muestra en la siguiente figura.

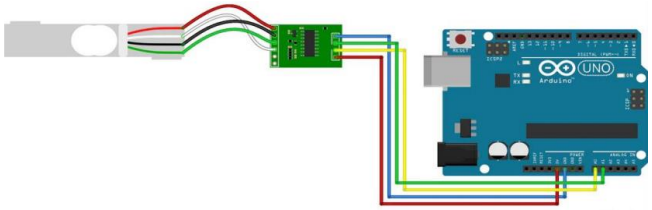


Figura 1. Esquema eléctrico del acoplamiento de las celdas de carga.

Para hacer la calibración de las celdas de carga fue necesario calcular el factor de calibración conforme a la siguiente ecuación:

$$Cf = c\ mt\ mx / mt \quad (1)$$

Donde:

Cf es el factor de calibración
C es la constante de calibración
mt es la masa total
mx es la masa desea

La constante de calibración de las celdas de carga se obtuvó conforme a la siguiente tabla:

Tabla 1. Constante de calibración para las celdas de carga

Contante de calibración (C)	Masa total (mt)
40780	1000g
20390	500g
10195	250g
4078	100g

Sustitutyendo los valores en la ecuación 1 para una masa deseada (mx) de 100g, el factor de calibración es:

$$Cf = c\ mt\ mx / mt$$

$$Cf = (40780)\ (1000g)\ (100g) / 1000g$$

$$Cf = 4078\ g$$

Después de haber realizado diferentes pruebas se estableció que los sensores deberían de ser activados al detectar un peso de 50 gramos, para obtener el factor de calibración solo se debe aplicar la fórmula de la ecuación 1.

$$Cf = c\ mt\ mx / mt$$

$$Cf = (40780)\ (1000g)\ (50g) / 1000g$$

$$Cf = 2039\ g$$

Se obtuvo el valor de 2039 como factor de calibración, de esta manera se queda definido el factor de calibración para la elaboración del sistema.

2.2 Módulo SIM808

El módulo SIM808 posee tres entradas tipo SMA para la conexión de antenas Bluetooth, GSM y GPS, en este caso solo se utilizó las antenas GSM y GPS. Cuando se adquiere el producto SIM808 este viene incluido con sus respectivas antenas GSM y GPS lo cual solo es necesario identificar cual es la conexión de cada una de ellas y se procede a fijarlas en sus respectivos lugares para mantener un óptimo funcionamiento. En la figura 2 se observa cual es la Conexión de antenas hacia el módulo SIM808.

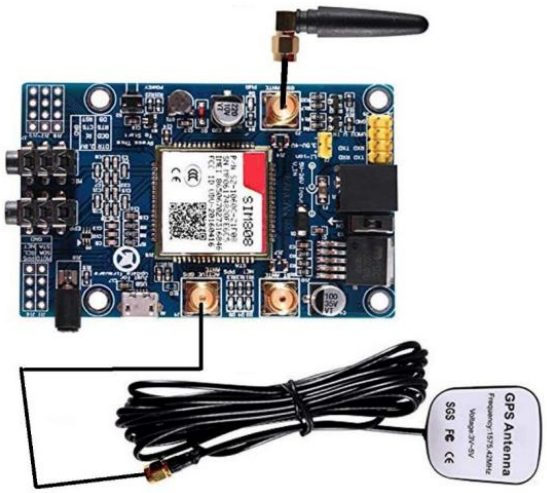


Figura 2. Conexión de antena hacia el módulo SIM808.

El módulo SIM808 cuenta con tres luces led que indican el estado en el que se encuentra el módulo, en la figura 3 se muestran las luces de estado encendidas al mismo tiempo.

Figura 3. Luces LED del estado del módulo SIM808.

Como se observa en la figura 3, la luz izquierda representa el estado activo de la señal GPS, la luz de en medio representa el estado activo de las luces de estado y por último la luz ubicada a la derecha indica la disponibilidad de red móvil (cuando establece conexión parpadea cada 3 segundos) Cuando se compila el código y no se encuentran errores, se procede a introducir las posiciones deseadas en x, y, z del deflector final.

El módulo SIM808 se acoplo con el arduino, como se muestra en la figura 4.

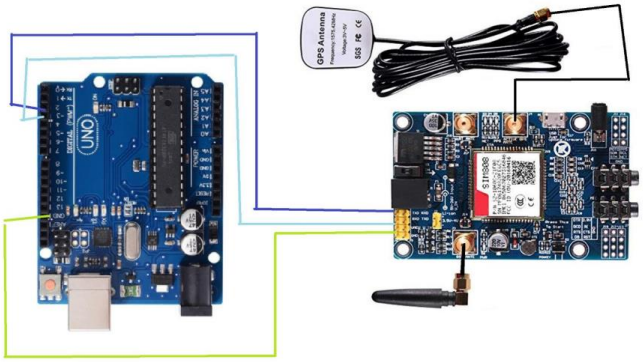


Figura 4. Conexión de módulo SIM 808 hacia la placa Arduino

Como se observa en la figura 4, el transmisor de puerto serie del módulo SIM808 se ubica en el pin dos de la placa Arduino UNO y el receptor de datos de puerto serie se ubica en el pin tres de la placa, además de que se toma GND de la placa Arduino al módulo SIM808.

2.3 Lógica de programación de la alarma de colisión posicional

En este apartado se presentan los diagramas de flujo que describen cada uno de los programas utilizados y que fueron cargados en el microcontrolador de la placa Arduino UNO. En la figura 5 se presenta a grandes rasgos el código de arranque, el que se ejecuta una sola vez y cumple con el ciclo de recepción de datos GPS, envió de mensaje de texto y llamada telefónica.

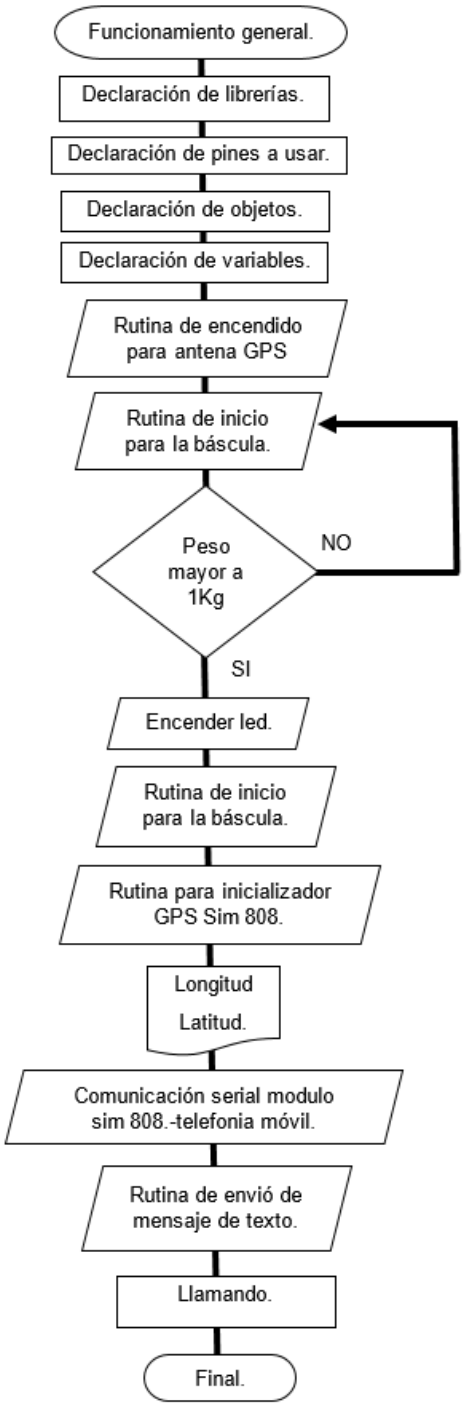


Figura. 5. Diagrama de flujo del programa general de la alarma de colisión posicional.

En la figura 6 se aprecia la función encargada de tomar el factor calibración de las celdas de carga.

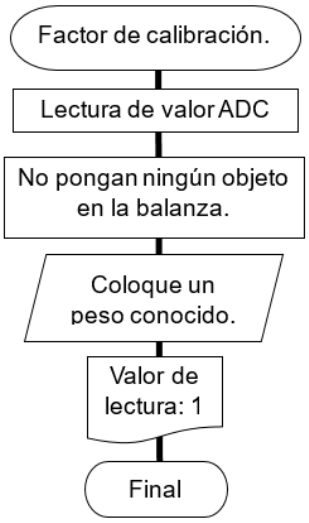


Figura. 6. Diagrama de flujo de la función factor de calibración.

En la figura 7 se muestra el diagrama correspondiente a la función bascula led, esta función permite tener un indicador cuando el sensor de carga ha rebasado un peso determinado mediante el factor calibración, para esta función se utilizó la condicional if, else ya que se debe sentenciar una condición en caso de detectar un peso que sobrepase un límite y de ser así el diodo led permanecerá activo.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 33, pp. 482 - 498.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

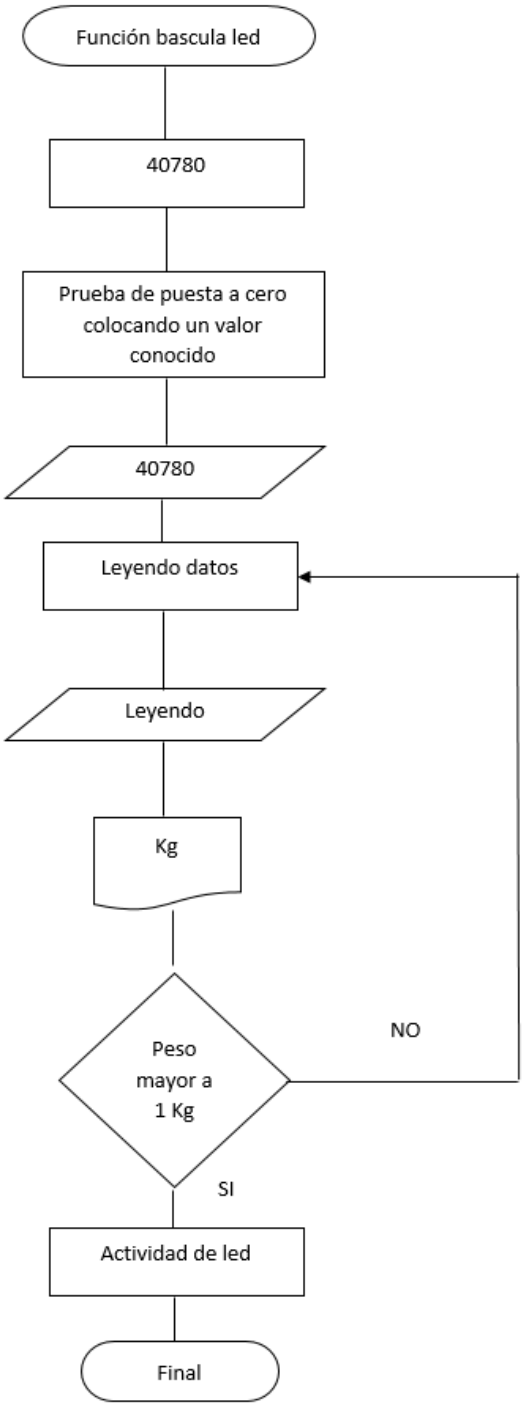


Figura. 7. Diagrama de flujo de la función bascula led

Por otra parte, en la figura 8 muestra la función de rutina de encendido para antena GPS módulo SIM808, en esta función destacan los comandos AT ya que estos comandos son declarados para ordenar al módulo SIM808 encienda la antena GPS, posteriormente se declara un comando utilizado para brindar datos de hora, fecha, posición, curso, velocidad; estos datos serán seleccionados al insertar el último comando el cual ordena al módulo SIM808 muestre los datos que recopilo duranta la búsqueda.

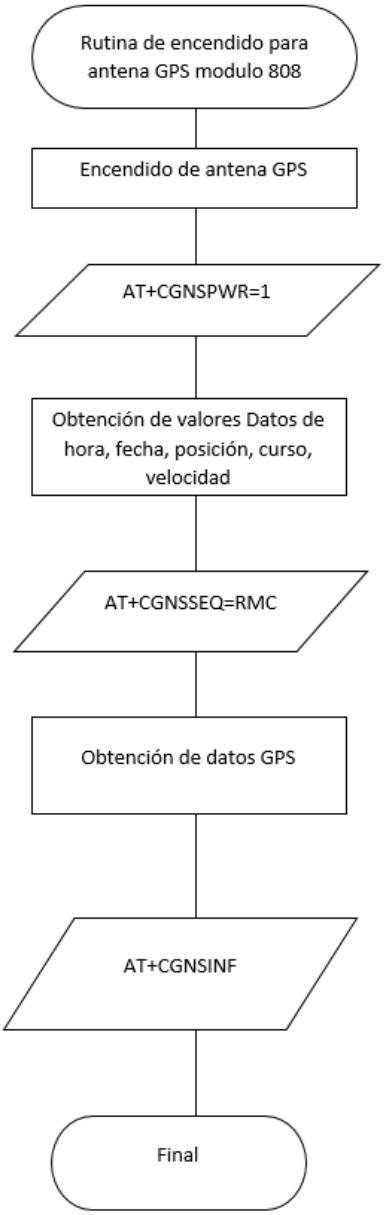


Figura 8. Rutina de encendido para antena GPS modulo SIM808

En la figura 9 se muestra la función encargada de establecer Comunicación serial modulo SIM808 con la telefonía móvil. Al igual que con la función GPS, para esta función se utilizan comandos AT, los cuales son esencialmente necesarios para que el sistema pueda enviar mensajes de texto y realizar llamadas.

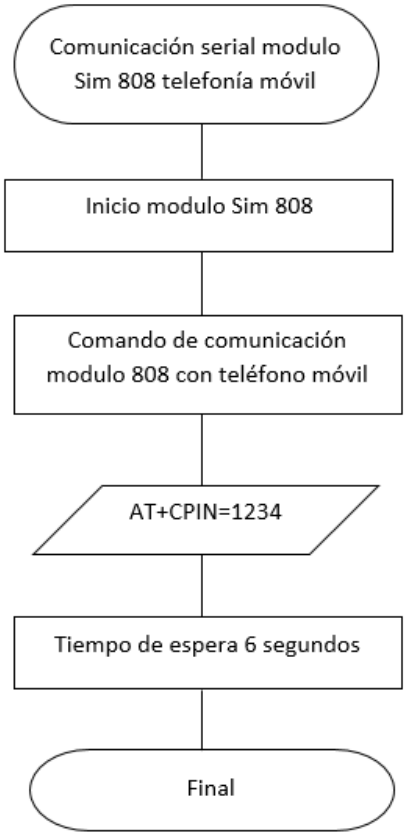


Figura 9. Comunicación serial del módulo SIM808 con la telefonía móvil

Es importante respetar el tiempo de espera que se solicita ya que si no se respeta y se realiza alguna otra función antes de que el módulo logre establecer conexión pueden ocurrir errores que afecten al buen funcionamiento del envío de mensajes y realización de llamada.

En la figura 10 se explica la rutina de envío de mensaje de texto, en esta función destaca la habilitación para envío de mensajes de texto, esto quiere decir que la red ha sido habilitada y cualquier mensaje puede ser enviado siempre y cuando exista cobertura telefónica , otra parte a destacar es la declaración del número telefónico al que será enviado el mensaje y por último, un enlace que redirecciona a el servicio de mapas brindado por la compañía Google a través de su plataforma Google maps.

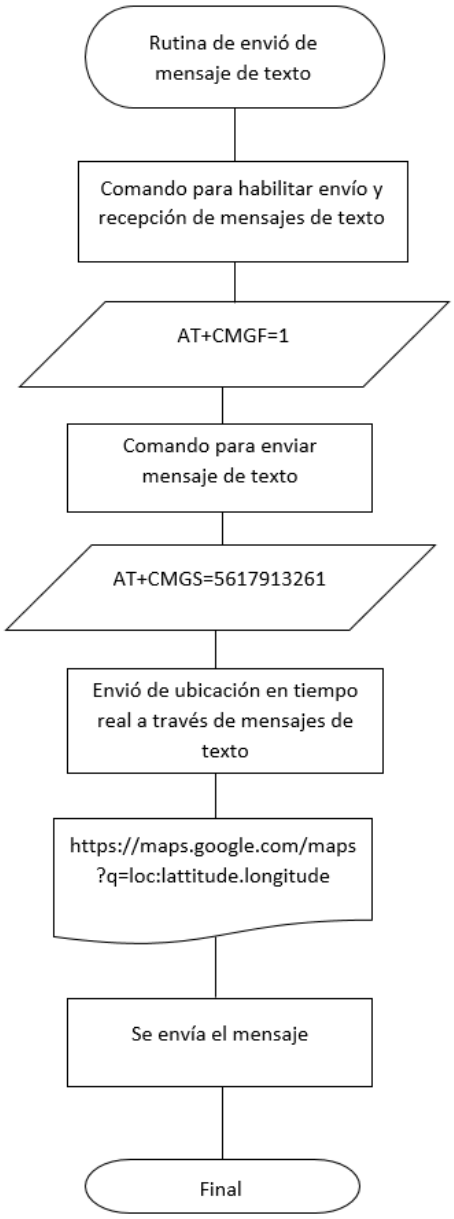


Figura 10. Rutina de envío de mensaje de texto.

En la figura 11 se agregó la función inicializador la cual consta de un arreglo for que solicita los caracteres necesarios para imprimir los datos de longitud y latitud, esta función es igual a la de GPS puesto que realiza el mismo trabajo, cabe aclarara que durante las pruebas se encontraron errores en el funcionamiento del código pero fueron solucionados mediante este arreglo inicial puesto que los datos de longitud y latitud no se ven reflejados al arranque del programa, por lo que esta función ayuda a cubrir ese error.

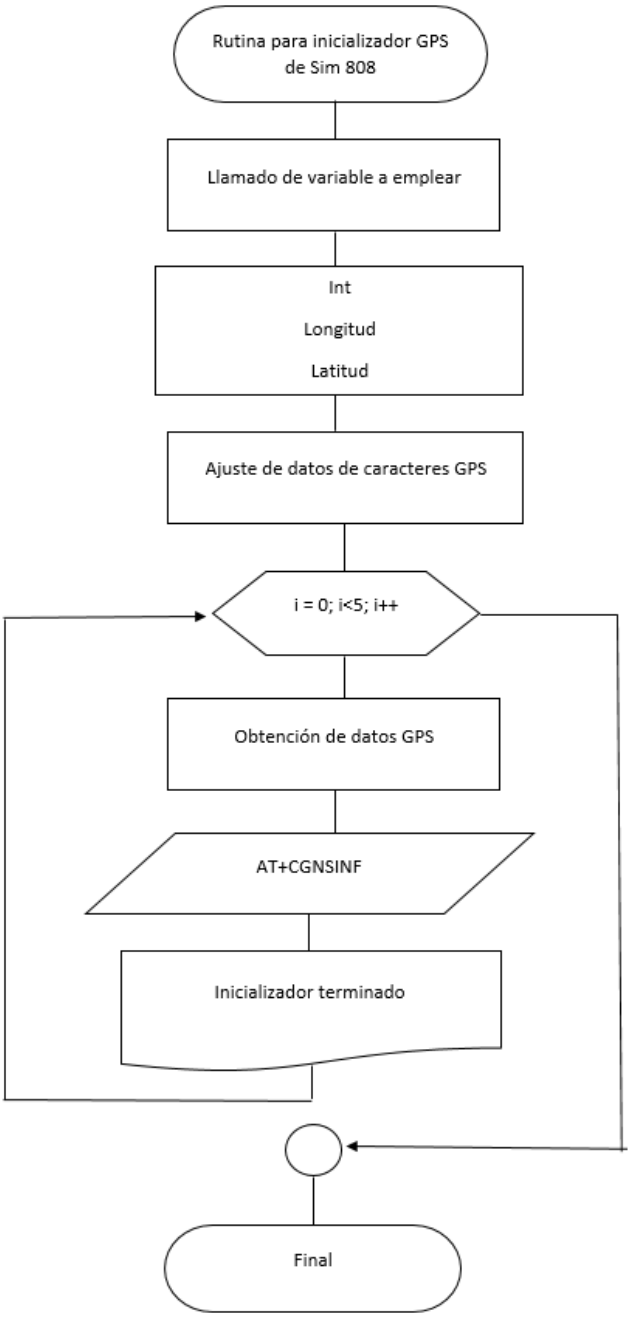


Figura 11 Función inicializador

En la figura 12 se contempla la Función real GPS del módulo SIM808, esta función es la que imprime los datos de longitud y latitud los cuales son utilizados junto con el enlace de Google maps, para que los datos sean arrojados de manera correcta el módulo SIM808 debe tener señal en la antena GPS, cuando la antena capta la señal es posible cumplir con el objetivo final del sistema el cual es enviar un mensaje de texto con la ubicación en tiempo real de donde se encuentra ubicado el módulo SIM808.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 33, pp. 482 - 498.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

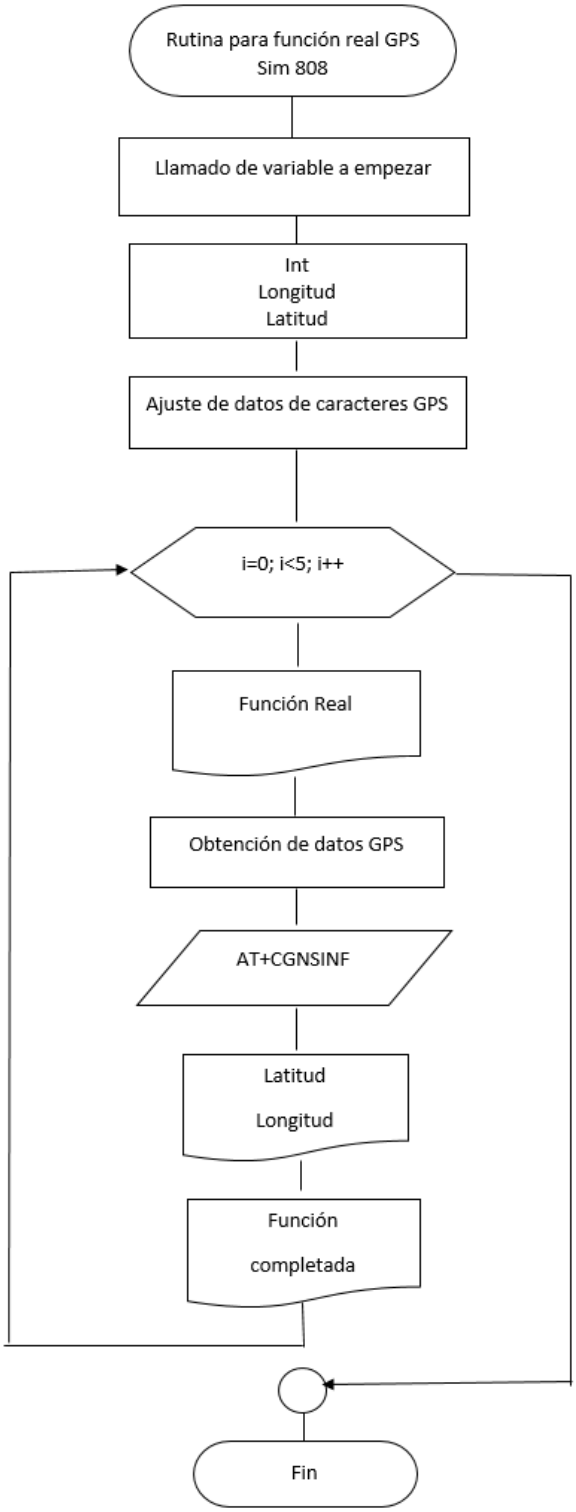


Figura 12. Función real GPS del módulo SIM808

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 33, pp. 482 - 498.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

3. Resultados

Las pruebas realizadas en un ambiente cerrado fueron las primeras que se realizaron ya que al estar conectado el Módulo SIM808 a un tomacorriente de 12V resultaba lejana la idea de hacer pruebas en el exterior.

Durante las pruebas en ambiente cerrado la respuesta de la antena GPS se vio afectada notablemente, puesto que al interactuar con los sensores estos mandaban las señal a la placa Arduino UNO, y esta a su vez mandaba ordenes al módulo SIM808 pero al no encontrar señal en la antena GPS el programa continuo mandando solo un enlace de Google Maps sin ningún dato de latitud y longitud, En la figura 13 se muestra la visualización de datos a través de una captura del teléfono celular receptor de mensajes del módulo SIM808.

Figura 13. Visualización de datos a través de un teléfono celular

Al no contar con los datos GPS requeridos el sistema manda un mensaje incompleto pues al faltar los datos de longitud y latitud no otorga una ubicación precisa.

En la figura 14 se pueden apreciar los Leds de estado sin activación de la antena GPS, al ubicarse en un ambiente cerrado se imposibilita la conexión eficaz con el satélite, por lo cual el módulo no refleja ese estatus activo en la zona de leds de estado.

Figura 14. Leds de estado sin activación de antena GPS

Lo primero que se realizó fueron las 10 simulaciones de cinemática directa e inversa para verificar su funcionamiento con diferentes datos ingresados.

Durante las pruebas en ambiente cerrado se monitoreo el puerto serie de IDE Arduino con el fin de comprobar los mensajes de estado y corroborar que no existieran errores en la ejecución del código. Al tomar la primera muestra de datos se notó la nula impresión de información GPS que es útil para el complemento del mensaje de texto con la ubicación en tiempo real. En la figura 15 se aprecia los resultados obtenidos a través del monitor serie.

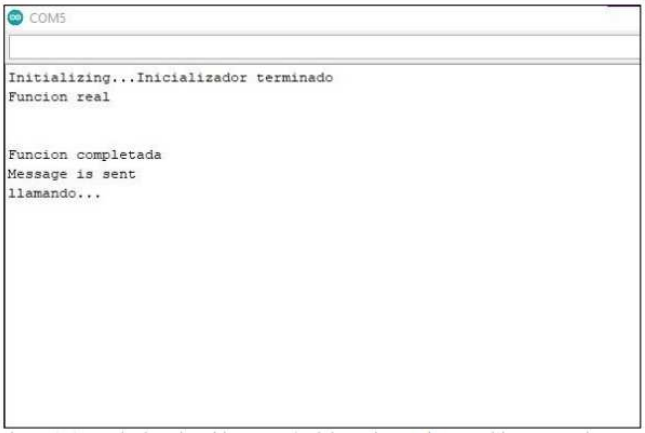


Figura 15. Resultados obtenidos a través del monitor serie en ambiente cerrado

Después de haber realizado pruebas en un entorno cerrado se optó por acercar el prototipo a un ambiente ideal en donde pudiese dar el máximo potencial y verificar sus resultados, por ende, fue necesario preparar un encapsulado donde los componentes pudiesen estar sin correr el riesgo de sufrir algún daño, además de incorporar la batería que energice los componentes del sistema con el fin de aumentar la eficiencia en su operación durante el exterior.

En la Figura 16 se muestran los Resultados obtenidos por el monitor serie en un ambiente abierto, cabe destacar el muestreo de datos de latitud y longitud afirmando que en espacios abiertos la funcionalidad es óptima.

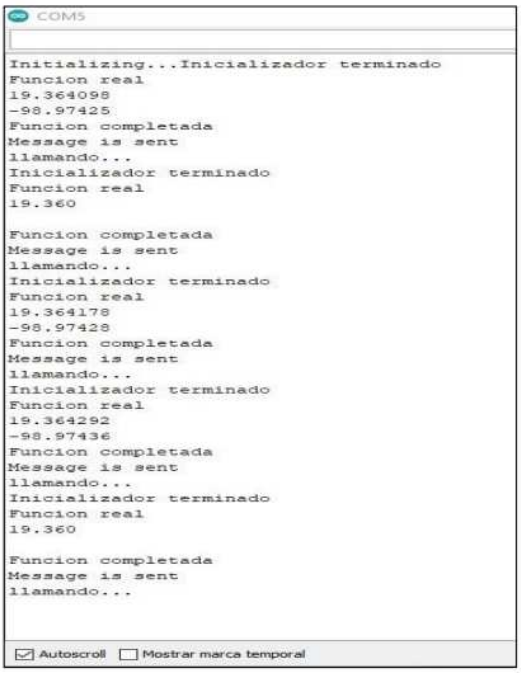


Figura 16. Resultados obtenidos por el monitor serie en un ambiente abierto.

Durante las pruebas realizadas, los mensajes de texto con el enlace de Google Maps eran precisos, salvo a una ocasión en donde la distancia mostrada tenía una diferencia de más de 1km con la ubicación original, se siguieron haciendo pruebas con el módulo después del fallo en la ubicación, pero al poco tiempo volvió a funcionar de manera correcta.

En la figura 17 se muestran las ubicaciones erróneas, mientras que en la figura 18 se muestra la ubicación correcta durante las pruebas.

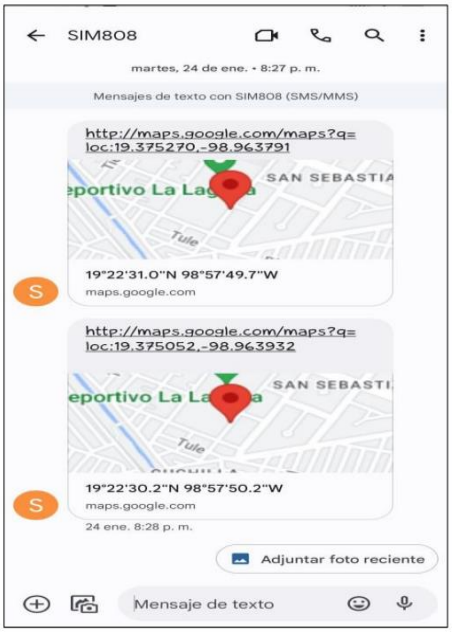


Figura 17. Ubicación errónea durante envío de mensaje de texto.

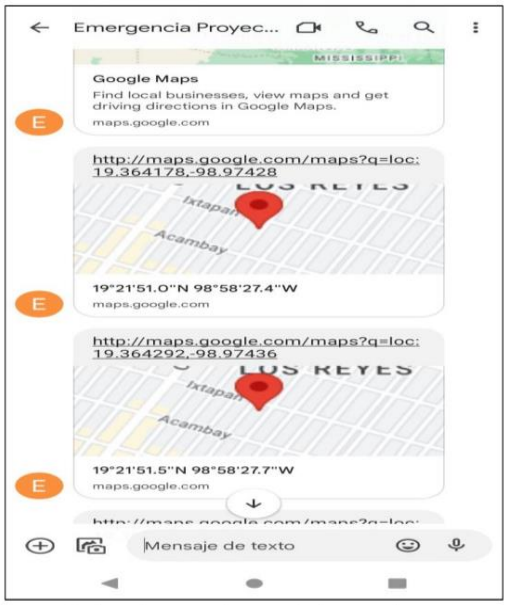


Figura 18. Ubicación correcta durante envío de mensaje de texto.

4. Conclusiones

Con este proyecto se busca dar solución a dos problemáticas alarmantes que es reducir el índice de personas perdidas en un accidente y la reducción de muerte de personas en accidentes aparatosos brindando ayuda dentro de la hora dorada.

Se busca dar solución a dicha problemática utilizando componentes accesibles y adaptables a cualquier tipo de vehículo automotor, como es el caso de sensores de peso que pueden detectar hasta 50 kg con una entrada de alimentación de 0.1v, también se cuenta con un módulo llamado SIM 808 que es el encargado de trabajar en conjunto con telefonía móvil y antena GPS y tiene una alimentación de 3,5 a 5V con una entrada de la fuente de alimentación a 2 Amperes, utilizando la plataforma de la compañía Google la antena GPS puede obtener latitud y longitud de coordenadas de ubicación con ayuda del link de Google Maps para posteriormente enviarlos mediante un mensaje de texto esto con ayuda de un amplificador que convierte la señal analógica a digital conectando el módulo SIM 808 con la tarjeta Arduino que tiene una entrada de alimentación de 5v y 1 Amper, estos componentes cuentan con un código que manda indicación a cada componente con la función que debe realizar es decir a los sensores el peso que debe detectar, al módulo SIM que busque y obtenga la localización para mandar mensaje de texto con coordenadas y realizar la llamada al número registrado.

En las pruebas realizadas se contó con la limitación de red GPS ya que la antena trabaja con tecnología 2G y en lugares cerrados tarda mucho en recibir señal se tuvo que hacer diferentes pruebas en lugares con una intemperie más adecuadas, el módulo cuenta con un pequeño margen de error ya que puede enviar ubicación con un rango aproximado de 1.5km de la ubicación real, aunque en realidad esto depende de las coordenadas satelitales que envía Google maps.

También se tuvo que reducir la capacidad de peso a 50 gramos para que los sensores detecten el impacto y así simular una colisión y no dañar las estructuras ni sistema de la motocicleta.

Referencias

[1] INEGI, «INEGI,» 13 11 2020. [En línea]. Available: https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa/noticia.html?id=6045. [Último acceso: 26 10 2022].

[2] Organizacion Mundial de la Salud, "*Organizacion Mundial de la Salud*", 20 06 2022. [En línea]. Available: https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries. [Último acceso: 11 11 2022].

[3] IPSUM, "*Reconstruccion de Accidentes de Trafico*", 16 12 2019. [En línea]. Available: https://reconstruccionaccidentestrafico.com/tipos-de-colision-entre-vehiculos-en-accidentes-trafico/. [Último acceso: 19 10 2022].

[4] Q. M. Mendoza, "*Seguridad vial en carreteras*", Sanfandila, Queretaro, 2003.

[5] Fundacion CEA, "*El sueño y la fatiga en la conduccion*, *¿Cuales son los habitos de los conductores españoles?*", España, 2015.

[6] Arduino, «Arduino,» 05 02 2018. [En línea]. Available: https://www.arduino.cc/. [Último acceso: 05 11 2022].

[7] https://mexico.newark.com/microchip/atmega328p-pn/microcontroller-mcu-8-bit-atmega/dp/68T2943#. [Último acceso: 28 11 2022].

[8] Circuitos Digitales de Mexico, "*Circuitos Digitales de Mexico*", [En línea]. Available: https://circuitosdigitalesdemexico.com.mx/producto/modulo-sim808-con-gsm-gprs-gps-bluetooth-y-radio-fm/. [Último acceso: 12 12 2022].

[9] Naylamp Mechatronics, "*Naylamp Mechatronics*", [En línea]. Available: https://naylampmechatronics.com/fuerza-peso/147-modulo-hx711-transmisor-de-celda-de-carga.html. [Último acceso: 15 12 2021].

[10] Wimba Create, "*Manual de programacion Arduino*", [En línea]. Available:http://dfists.ua.es/~jpomares/arduino/page_04.htm. [Último acceso: 02 12 2022].

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 34, pp. 499 - 508.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Sistemas IoT para Control Ambiental de una Cámara de Maduración para Jitomate

Alfaro Camacho Jonathan Ivan[1], Laguna Morales Juan Pablo[1], Rosas Landeros Brandon[1], Villegas García Jesús Salvador[1] y Omar Josue Arzate Rivas.

Tecnológico Nacional de México en Celaya[1].

juan-p-a2011@hotmail.com

1. Resumen

Este artículo describe el diseño y desarrollo de un sistema IoT para el control y monitoreo de una cámara de maduración de jitomate. Se utilizó un microondas modificado con diversos componentes electrónicos, como el ESP32, ESP32-CAM, sensores DHT22 y un módulo RFID, para supervisar las condiciones de temperatura y humedad dentro de la cámara. Los datos ambientales se transmiten en tiempo real a una página web accesible desde cualquier dispositivo conectado a Internet. Además, se implementó un sistema de control remoto que ajusta automáticamente las condiciones óptimas dentro de la cámara para el proceso de maduración. Este proyecto demuestra cómo las tecnologías IoT, específicamente el ESP32 y ThingSpeak, pueden aplicarse en la agricultura y la industria alimentaria para mejorar la calidad del producto y optimizar el proceso de maduración, reduciendo pérdidas y aumentando la eficiencia.

Palabras clave: ESP32, Humedad, Temperatura, IoT.

Abstract

This article presents the design and development of an IoT-based system for monitoring and controlling a tomato ripening chamber. A modified microwave was used, integrating several electronic components such as the ESP32, ESP32-CAM, DHT22 sensors, and an RFID module to supervise the temperature and humidity inside the chamber. Environmental data is transmitted in real-time to a web page accessible from any internet-connected device. Additionally, a remote control system was implemented, automatically adjusting optimal conditions for the ripening process. This project demonstrates how IoT technologies, particularly ESP32 and ThingSpeak, can be applied in agriculture and the food industry to improve product quality and optimize the ripening process, reducing waste and increasing efficiency.

Keywords: ESP32, Humidity, Temperature, IoT.

2. Introducción

En la industria alimentaria, especialmente en el sector hortícola, tener un control de la maduración de las frutas es indispensable, ya que mantener los alimentos frescos y alargar la vida del producto, evita la aparición de patógenos y toxinas perjudiciales dentro de los alimentos, los cuales provocan perdidas cuantitativas en los mismos [1].

Aunque existen métodos para madurar la fruta, como los contenedores herméticos, donde se almacenan en un recipiente o bolsa hermética para una maduración a pequeña escala, evitando el escape de etileno que reproduce y acelera maduración. Otra técnica ampliamente utilizada son las

cámaras de humo, en las cuales las frutas son colocadas en habitaciones donde circula humo para inducir la maduración. El control de la maduración de las frutas es un proceso crucial en la industria agroalimentaria, ya que permite extender la vida útil de los productos y garantizar su calidad, además de poder almacenar y transportar grandes cantidades de frutas.

El avance tecnológico ha provisto de métodos no destructivos e invasivos para evaluar un objeto de forma cuantitativa, como el color, con el cual se pueden realizar comparaciones a lo largo del tiempo de maduración [3]. Un ejemplo de lo mencionado es el jitomate, el cual es una fruta que toma diferentes coloraciones a lo largo de su ciclo de maduración, pasando de un color verde, a una coloración roja y finalmente a una café, por lo cual se desea obtener una maduración idónea basándose en los cambios del color, obteniendo una mejora en la experiencia del consumidor. En una prueba, donde se utilizaron dos tipos de ketchup, la primera muestra fue menos preferida ya que contaba con un tono mayor a 35 valores de luminosidad, contra una muestra con valores de luminosidad entre 32 a 34 [4].

La maduración organoléptica es un proceso crucial en el desarrollo de las frutas y verduras, durante el cual alcanzan las características de color, textura, aroma y sabor que las hacen aptas para el consumo. Este proceso comienza generalmente en las etapas finales de la maduración fisiológica y marca el inicio de la senescencia, un periodo en el que se producen una serie de transformaciones físicas, bioquímicas y fisiológicas que determinan la calidad y vida útil postcosecha de las verduras. Entre estas transformaciones se encuentran cambios en el color, la composición de proteínas, carbohidratos, ácidos orgánicos y polifenoles, así como la producción de aromas, el incremento de la actividad respiratoria y la producción de etileno. Estos fenómenos no solo reflejan cambios físicos y químicos con el tiempo, sino que también definen las características de palatabilidad y aceptación por parte del consumidor, ya sea que las frutas o verduras se consuman directamente o se utilicen en productos procesados [5]

En el contexto del creciente campo del Internet de las Cosas (IoT), el cual consiste en sistemas ciberfísicos y computación integrada que utilizan la infraestructura de Internet, las aplicaciones y servicios que la componen [6], la capacidad de establecer comunicaciones inalámbricas confiables y eficientes es fundamental para el desarrollo de sistemas inteligentes. La placa de desarrollo ESP32 destaca por su capacidad para establecer comunicaciones inalámbricas, tanto vía Wi-Fi como Bluetooth, incluido Bluetooth Low Energy (BLE). Esta placa es ampliamente utilizada en proyectos de IoT (Internet de las cosas), debido a su bajo consumo de energía. Por otro lado, ThingSpeak es un software de código abierto que permite a los usuarios comunicarse con dispositivos habilitados para Internet. Facilita el acceso, la recuperación y el registro de datos al proporcionar una API para los dispositivos y sitios web de redes sociales.

En este artículo se propone el desarrollo de una cámara de maduración que permita el monitoreo y control de condiciones ambientales de temperatura y humedad. El sistema de control está basado en la placa de desarrollo ESP 32, la cual permite ajustar y mantener los parámetros de maduración dentro de los rangos deseados, además se desarrolló una interfaz web amigable y de fácil uso para el monitoreo y control de la cámara de maduración desde cualquier dispositivo conectado a internet integrando gráficas del sitio ThingSpeak para la visualización en tiempo real de los datos registrados, de igual manera, el sistema de visualización integra un vídeo en tiempo real de la cámara de maduración para una supervisión completa del proceso.

3. Métodos

Como se muestra en la Figura 1. El sistema propuesto se basa en 3 etapas las que permiten la recopilación de las variables principales para el control del crecimiento y la maduración de los que tomates, las cuales son almacenadas en una base de datos en la nube. El sistema permite visualizar la información contenida en desde cualquier lugar con acceso a internet a través de una página web donde además es posible en control automático y manual de dichas variables.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 34, pp. 499 - 508.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

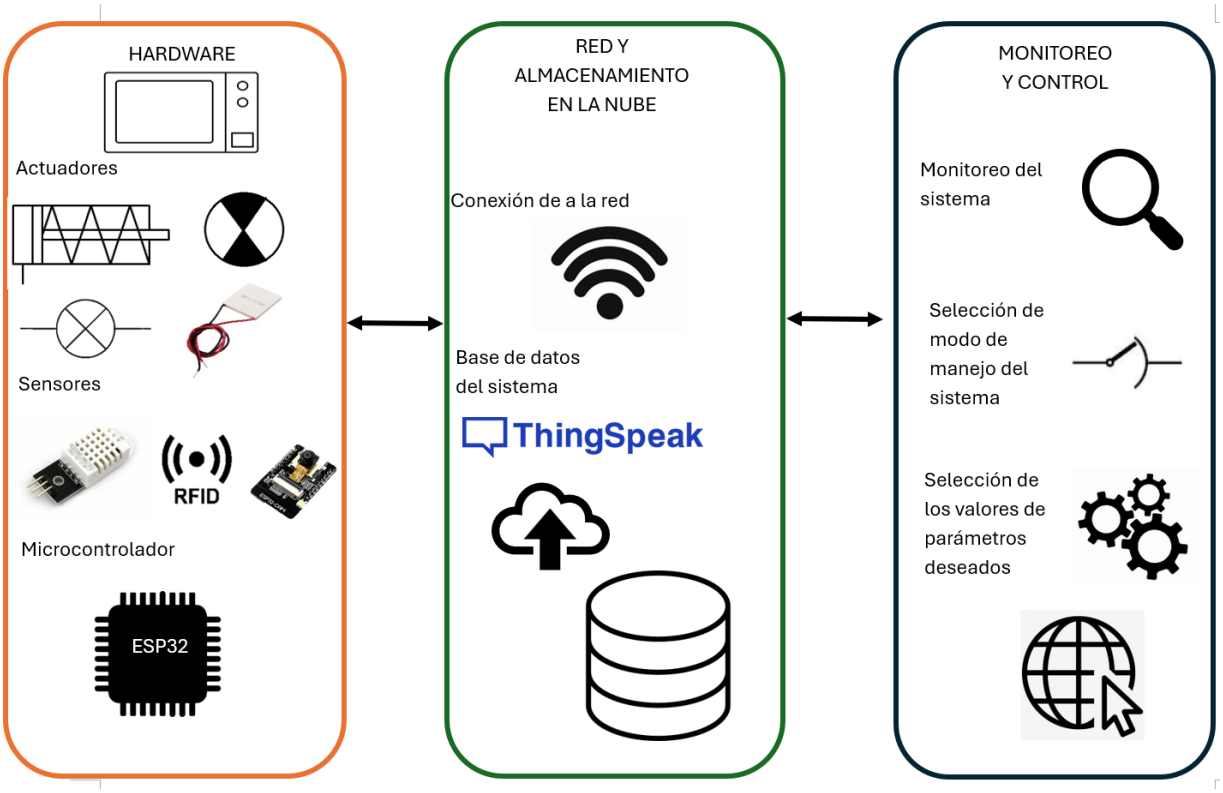


Figura 1. Etapas del sistema Iot de la cámara de maduración.

El sistema físico lo conforma un microondas de la marca DAEWOO, una placa de desarrollo ESP32, una ESP32-Cam, un sensor RFID, un sensor DHT22, un ventilador, una celda peltier, un pistón eléctrico, módulos de relevadores y módulos led, los cuales se encuentran integrados dentro de un gabinete que forma parte del microondas para proteger de factores externos.

El microcontrolador utilizado es un módulo ESP32 el cual se conecta a una red Wi-Fi y es energizado por una fuente de voltaje de 5 V DC. Para el monitoreo de temperatura y humedad dentro de la cámara se implementó un sensor DHT22 y para la supervisión visual se utilizó un ESP32-Cam. Se empleó un módulo RFID para controlar el acceso al área de desarrollo. En la parte de actuadores, se instaló un enfriador termoeléctrico para el control de temperatura dentro de la cámara. Se adicionó un ventilador para la extracción de la humedad dentro de la recámara. Para el control de acceso, se utilizó un pistón eléctrico que sirve como sistema de apertura y cierre de la puerta de la cámara de maduración. Un módulo LED es utilizado para la iluminación interna de la cámara. Módulos de relevadores son empleados para la activación de los diversos actuadores.

En la segunda etapa, el ESP32 se conecta a la red mediante el protocolo Wi-Fi donde se solicita el nombre de la red y la contraseña, una vez que el microcontrolador haya establecido conexión con la red procede a conectarse al sitio web Thingspeak a través de las ºcredenciales correspondientes que permiten la transferencia y almacenamiento de la información sobre las variables y la configuración.

En la última etapa o etapa de monitoreo y control, se desarrolló una página web que permite al usuario visualizar los datos de desde cualquier lugar con conexión a internet. La página web muestra en tiempo real el valor de las variables a través de dos gráficas, una por cada variable y una ventana para visualizar el interior de la cámara, así como la elección entre el modo manual y el modo automático, igualmente posee un botón para iluminar la recámara interior y otro botón para establecer los valores de temperatura y humedad deseados en el modo automático.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 34, pp. 499 - 508.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

El dispositivo ESP32 se conecta al sitio Web ThingSpeak donde se selecciona el modo de trabajo entre automático y manual. En el modo automático, el sistema se establece una temperatura de 18°C y una humedad relativa del 75% como se observa en la Figura 2.

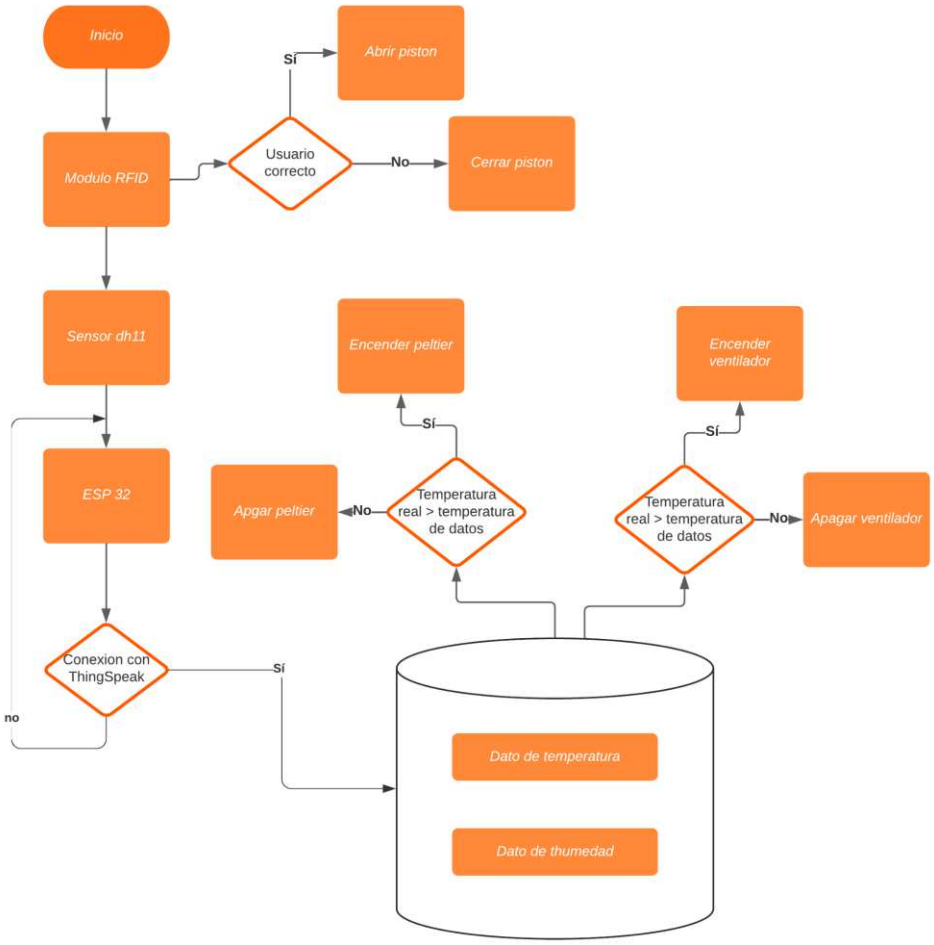


Figura 2. Diagrama de fujo del funcionamiento de sistema

Como se observa en la Figura 3. la aplicación web tiene un diseño amigable e intuitivo para el usuario, del lado izquierdo se encuentra el título de la aplicación, de igual forma se encuentra la región donde se selecciona el modo de trabajo y un botón de encendido y apagado de luces. En el centro se visualizan las gráficas de temperatura y humedad y el video en tiempo real del estado dentro de la cámara de maduración.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 34, pp. 499 - 508.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

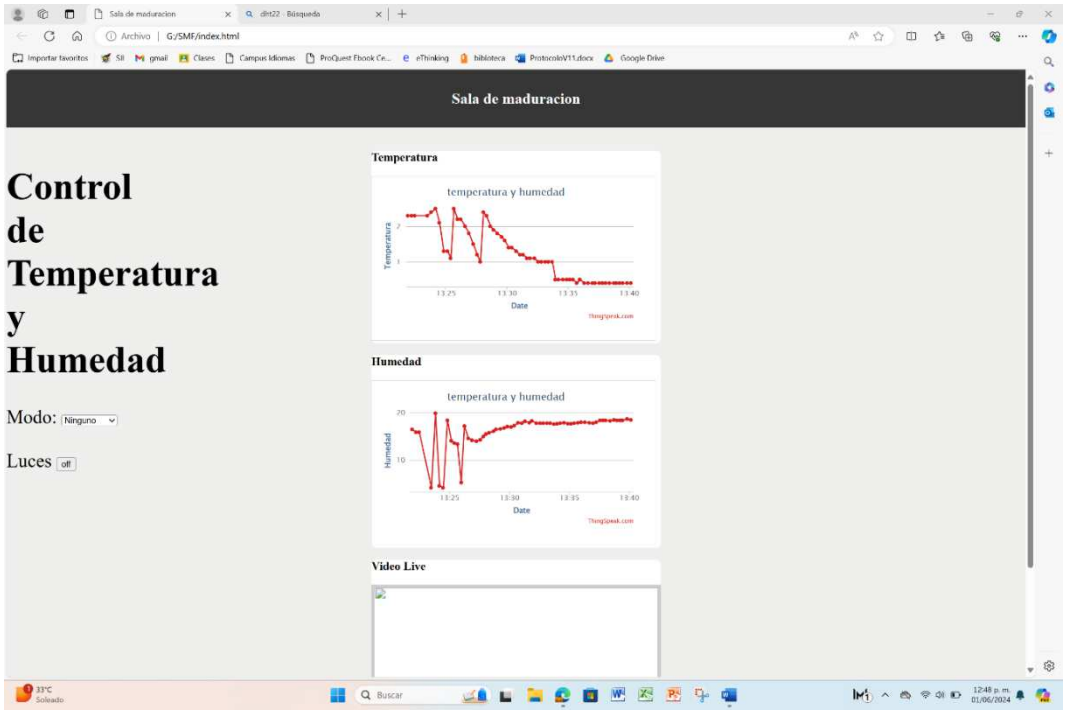


Figura 3. Diseño de la página web

En la Figura 4, se muestra el diagrama de flujo a seguir para el funcionamiento de la aplicación web, primeramente, el usuario elige un modo de trabajo, si el usuario elige el modo automático se enviará un 1 como dato a la página web ThingSpeak. Al elegir al modo manual se desplegará dos cuadros de texto donde el usuario colocará el número de la temperatura y humedad deseada, tendrá que hacer click en el botón “Establecer” para poder enviar ese dato a ThingSpeak.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 34, pp. 499 - 508.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

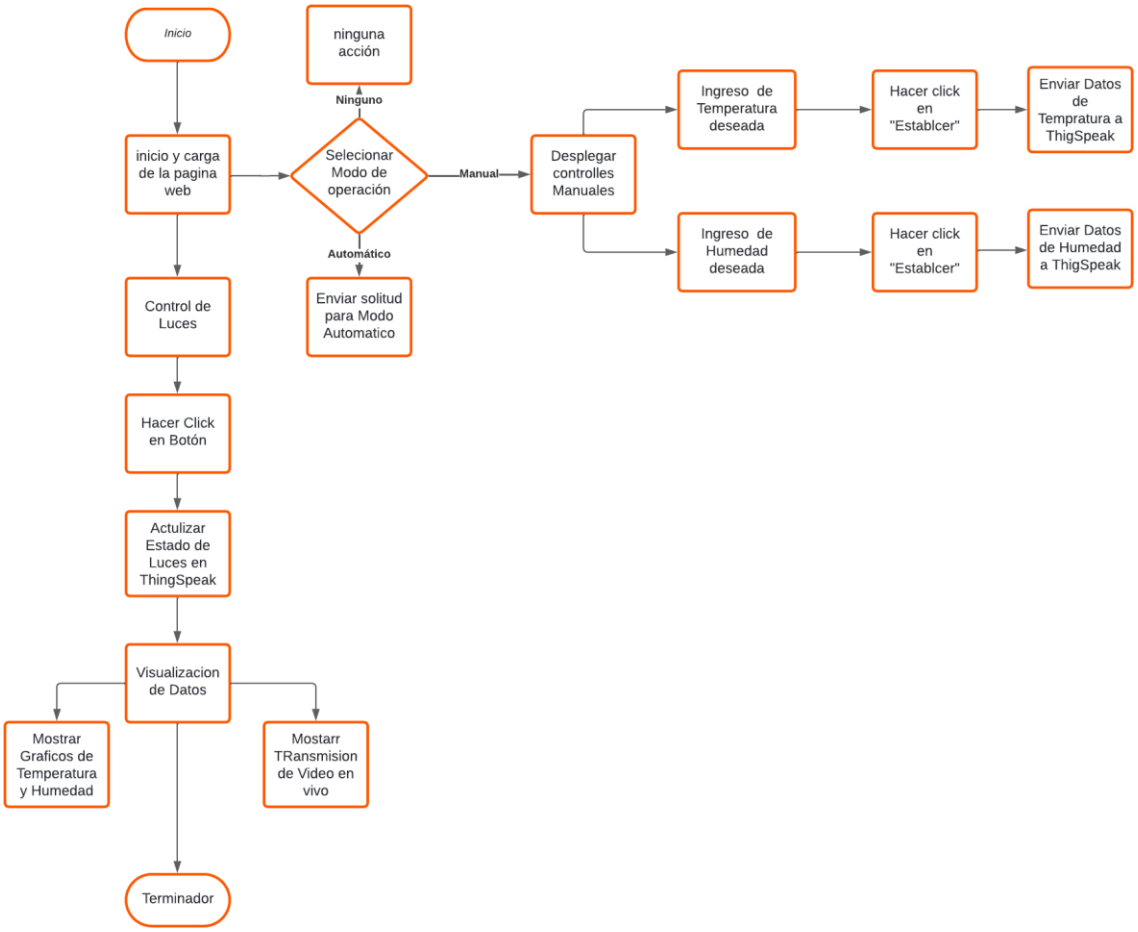


Figura 4. Diagrama de flujo del funcionamiento de la página web

4. Resultados

Se Realizaron diversas pruebas de funcionamiento, donde a través de la página web de ThingSpeak se obtuvieron las gráficas mostradas en la Figura 5, donde la temperatura ingresada fue de 0ºC y la humedad propuesta fue del 20%.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 34, pp. 499 - 508.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

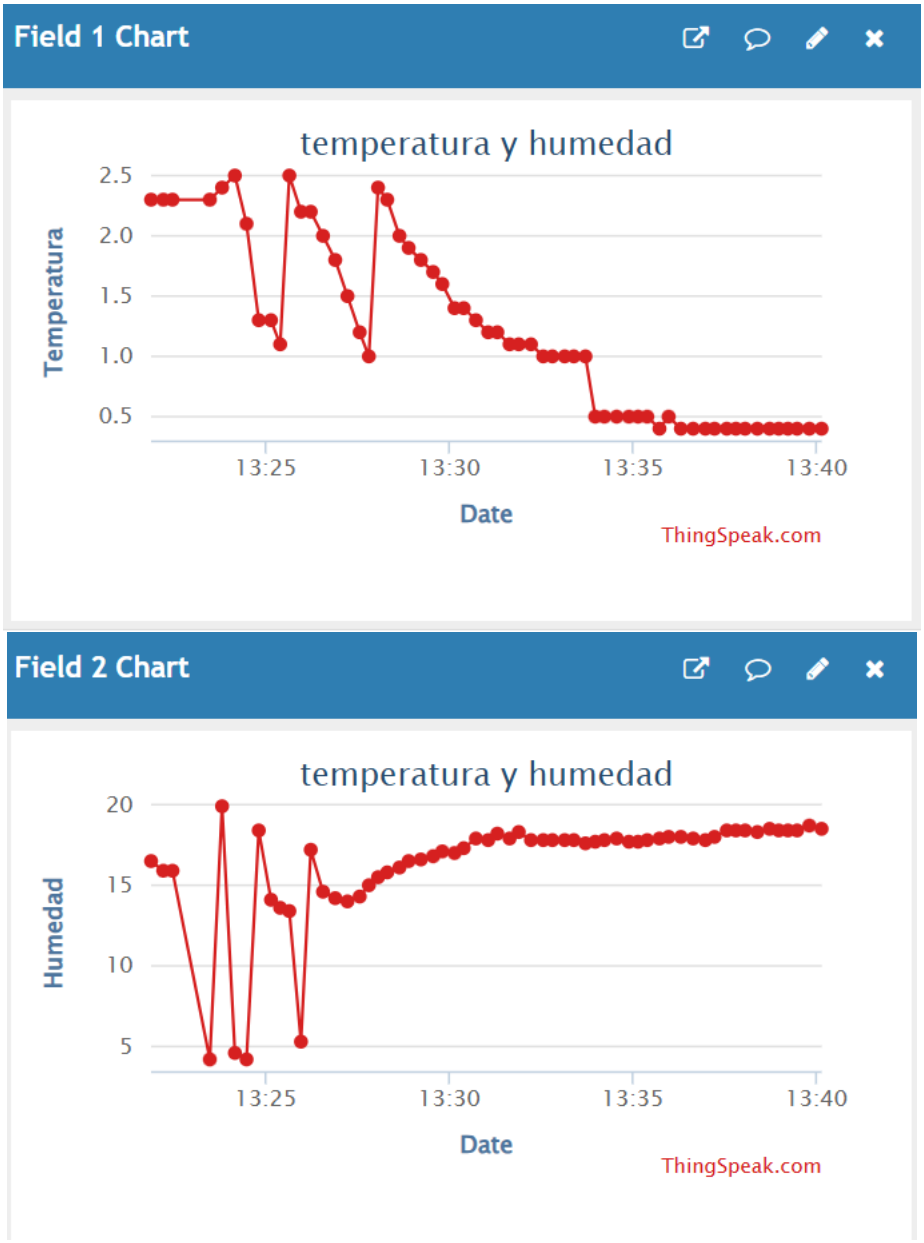


Figura 5. Temperatura y humedad registrada dentro de la cámara de maduración.

En la figura 6 se observa el dispositivo desarrollado en funcionamiento donde se visualiza en modo de trabajo manual con la iluminación activa, haciendo más fácil la visualización de los productos en su interior.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 34, pp. 499 - 508.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

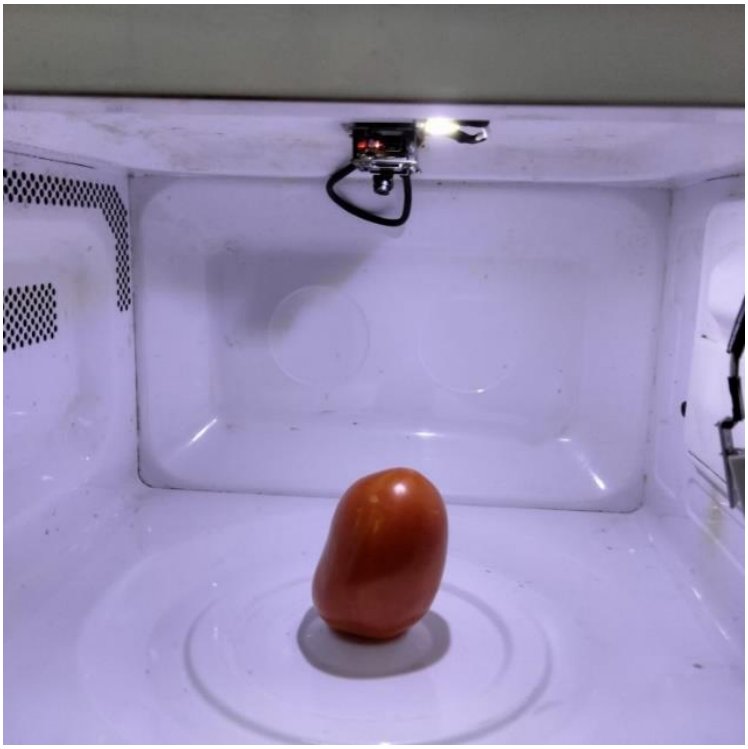


Figura 6. Encendido de luz desde la página web

En la figura 7 se observa la imagen tomada y transmitida hacia la aplicación web por el dispositivo ESP32-CAM.

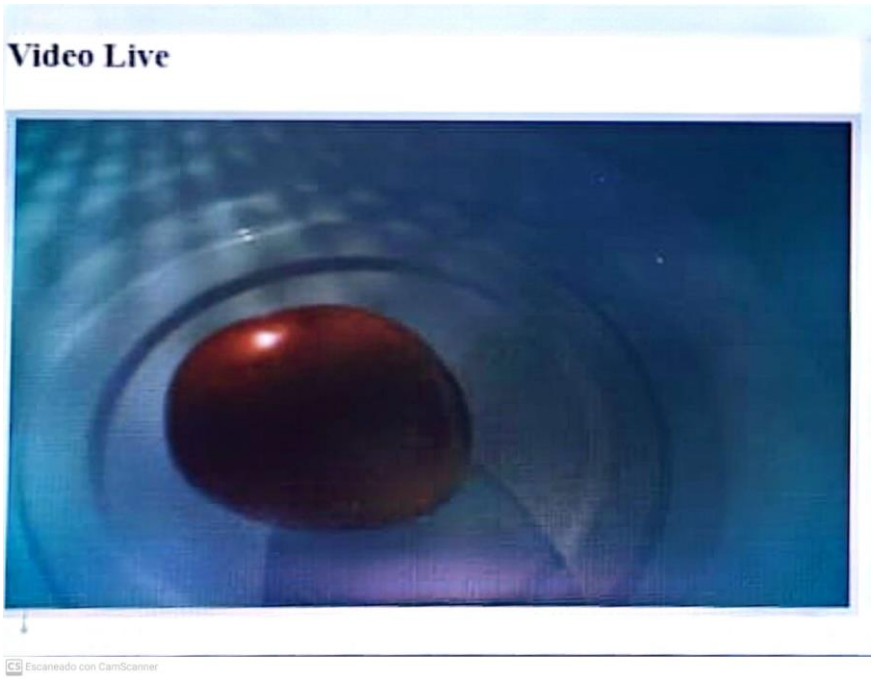


Figura 7. Calidad del video de transmisión

5. Discusión

Los resultados arrojan que el sistema desarrollado es capaz de controlar la temperatura dentro de una cámara de maduración, transmitir los datos recopilados en tiempo real a una página web y visualizar el proceso de maduración y estado de los jitomates desde una aplicación web.

Aunque actualmente existen cámaras de maduración como son las fabricadas por cryo systems o coreco estos sistemas no son capaces de tener un monitoreo a tiempo real de las variables ambientales dentro de la cámara, de igual manera, tampoco contienen un sistema de vigilancia para el cuidado de los productos en su interior.

El objetivo de este proyecto es el ampliar el uso de internet de las cosas en el sector alimentario, teniendo un proceso más inteligente y controlado, representando menos pérdidas.

Aunque el sistema tiene algunas limitaciones por el uso de Thingspeak que no permite enviar demasiados datos en poco tiempo, igualmente el uso de la celda peltier que requiere una fuente de mucho amperaje y un sistema adicional independiente disipador de calor, ya que este tipo de celdas suelen calentarse demasiado.

Se sugiere como trabajo a futuro el colocar y distribuir de mejor manera la celda peltier teniendo una mejor disipación del calor, recubrir la cámara interna del microondas con un material no tóxico, unicel o tela térmica para que el interior de la cámara conserve de una mejor manera la temperatura, el uso de un control PID generará un mejor control con mayor precisión en la temperatura y la humedad.

Se pretende mejorar el sistema colocando luz ultravioleta para la eliminación de microorganismos que pueden contaminar las verduras, se espera agregar algoritmos de detección de color a través del vídeo alertando al usuario a través de la página web cuando el color del jitomate haya alcanzado el punto máximo indicando su maduración óptima.

La implementación de sistemas IoT monitorizados por páginas web en el sector alimentario no solo optimiza el proceso de maduración de frutas y verduras, sino que también representa un avance significativo hacia una agricultura inteligente y sostenible. Al reducir pérdidas y mejorar la calidad del producto, estos sistemas contribuyen a una cadena de suministro más eficiente y responsable, beneficiando tanto a productores como a consumidores. La capacidad de monitorizar y controlar condiciones críticas en tiempo real asegura que las frutas y verduras sean tratadas adecuadamente, maximizando su valor y minimizando el desperdicio

El articulo demuestra que la integración de sistemas IoT en la maduración de frutas y verduras es viable y beneficiosa. A pesar de las limitaciones actuales, las sugerencias propuestas ofrecen vías para mejorar el rendimiento y la eficiencia del sistema. La adopción de tecnologías IoT en el sector alimenticio es crucial para enfrentar los desafíos modernos de producción y distribución, promoviendo una gestión más inteligente y eficaz

6. Conclusiones

Este sistema tiene el potencial de mejorar significativamente la eficiencia y la calidad en el proceso de maduración de frutas y verduras. Al contar con un sistema de control y monitoreo remoto, los usuarios podrán optimizar los tiempos de maduración, reducir pérdidas por sobre maduración o daños, y garantizar la calidad de los productos. Además, la integración de gráficas de ThingSpeak y el video en tiempo real permitirá un seguimiento exhaustivo del proceso, facilitando la toma de decisiones y la detección temprana de posibles problemas. En resumen, este articulo busca desarrollar una solución innovadora y eficiente para el control y monitoreo de cámaras de maduración, utilizando tecnologías de vanguardia y una interfaz web intuitiva y accesible.

La implementación de un sistema de monitoreo y control basado en tecnologías IoT para cámaras de maduración de frutas y verduras ha confirmado su eficacia como estrategia de optimización en la industria agrícola. El uso de sensores y actuadores manejados a distancia ha garantizado una monitorización ininterrumpida y exacta de las condiciones ambientales en la cámara de maduración, asegurando así el mantenimiento de un entorno ideal para el proceso de maduración.

Bibliografía y Referencias

[1] Coreco. *"Cámaras frigoríficas para frutas y verduras"*. https://coldroomscoreco.com/sector/fruteria/ (Consultado: junio 1, 2024)

[2] Admin (2024). "*Sala de maduración de frutas"* - Preguntas frecuentes. Cryo Systems.

[3] CLAYBON K.T., BARRINGER S.A. (2002(. "*Consumer acceptability of color in processe"* https://cryo-systems.com/es/sala-de-maduracion-preguntas-frecuentes/ d tomato products by African-American, Latino and prototypical

[4] INTELMANN D., JAROS D., ROHM H. 2005. *"Identification of color optima of commercial tomato catsup"*. European Food Research and Technology 221(5):662-666

[5] VILLAMIZAR DE B., F.; OSPINA M., J.E. "*Frutas y hortalizas. Manejo tecnológico postcosecha"*. Santafé de Bogotá, SENA-Universidad Nacional de Colombia, 1995.84 p.

[6] "*Internet de las cosas: definición y ejemplos"* | Universitat Carlemany. (2024, 25 marzo). UCMA. https://www.universitatcarlemany.com/actualidad/blog/internet-de-las-cosas-definicion-y-ejemplos/

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 35, pp. 509 - 518.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Acondicionamiento de Señal para Sensor Temperatura en Sonda de Medición de Resistividad Térmica

Pérez Orozco Juan Adrián[1]✉, Maganda Carvajal Jaime Alberto[1], Robles Vargas Juan Carlos [1], Zavala Domínguez María Sofia [1], Ramírez Reséndiz Miguel Ángel [1] y Mejía Hernández Guillermo Eduardo [1].

[1]Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Querétaro[1]✉juan.po@queretaro.tecnm.mx

Resumen

Comparamos dos circuitos para acondicionar la señal de un sensor de temperatura resistivo, RTD, de tres terminales. El sensor utilizado fue un PT100 clase A de tres terminales. Para acondicionar la señal usamos de manera separa dos circuitos. El clásico puente de Wheatstone y otro basado en una fuente de corriente constante. Para los dos casos realizamos mediciones de temperatura cercanas a 0°C y 100°C y capturamos los datos usando una tarjeta de adquisición de datos, con un muestro de 100 muestras/seg. Presentamos la comparación de los dos métodos para acondicionar la señal. De los resultados observamos que ambos circuitos cumplen con su función. De los dos métodos el más sencillo de implementar es el puente de Wheatstone y con este se tienen mediciones cercanas a las teóricas. Implementar el circuito con la fuente de corriente constante es necesario cuando las resistencias de los cables son significativo. Concluimos que, para nuestra aplicación, por su simplicidad, su bajo costo la mejor es el puente de Wheatstone.

Palabras clave: Sensor de temperatura. Acondicionamiento de señal. Puente de Wheatstone. Fuente decorriente constante.

1. Introducción

Los detectores de temperatura de resistencia RTD son sensores basados en metales. La resistencia de todos los metales tiene una dependencia positiva de la temperatura; la resistencia aumenta cuando la temperatura aumenta. [1]. El más común de los RTD son los sensores de temperatura de la serie Pt100, que tradicionalmente se han utilizado para medir la temperatura en procesos de laboratorio e industriales. [2]. Para este tipo de sensores requiere de un circuito acondicionador de señal, que nos permita convertir la salida del sensor en una señal se pueda utilizar, en, por ejemplo: un microprocesador o un sistema de control analógico. El circuito acondicionador para en Pt100 convertira un valor de resistencia en una señal de voltaje. Este tipo de sensores RTD son utilizados en sondas para medir resistividad térmica del suelo [6,7]. Según los estándares internacionales en este tipo de sondas requiere un sensor con resolución de 0.1 °C. [5]. Es necesario pues, contar con una instrumentación que nos permita tener una medición precisa de pequeñas resistencias al aplicar sensores resistivos.

En este trabajo implementamos dos circuitos para acondicionar la señal. Por un lado, el clásico puente de Wheatstone [3] y, por otro, un circuito basado en una fuente de corriente constante [4]. Para realizar la comparación de las mediciones realizamos la medición de las temperaturas *de* aproximadamente *0°C y 100°C*. Que fueron, agua con hielo y agua hirviendo, correspondientemente. De las mediciones capturamos los datos usando una tarjeta de adquisición de datos DAQ 6008, la tasa

de adquisición de datos fue de 100 muestras/seg. Y, con la finalidad de eliminar el ruido utilizamos un filtro pasa bajas digital.

De los resultados de este trabajo concluiremos que tipo de circuito acondicionador de señal para una sonda de medición de resistividad térmica.

La medición de la temperatura en los procesos industriales es crítica para mantener el control de calidad, la seguridad y la eficiencia operativa. La temperatura influye directamente en las propiedades de los materiales y en la eficiencia de las reacciones químicas o físicas, lo que requiere una monitorización precisa. En sectores como la fabricación, la industria química y la metalurgia, un control inadecuado de la temperatura puede provocar fallos en la producción, reducir la vida útil de los equipos y aumentar el riesgo de accidentes.

Por eso, los detectores de temperatura de resistencia (RTD), como el Pt100, son muy importantes en fábricas y talleres para realizar mediciones de temperatura precisas y confiables, aprovechando la relación directa entre la temperatura y el metal sólido. Para convertir pequeños cambios en la resistencia en señales eléctricas para su uso por parte de sistemas de control o microprocesadores, se necesitan señales adecuadas, generalmente con circuitos como el puente de Wheatstone o el de corriente alterna. Esto permite una precisión de medición que cumple con los estándares globales, especialmente en sistemas complejos que requieren precisión, como las mediciones de temperatura del suelo.

2. Metodología

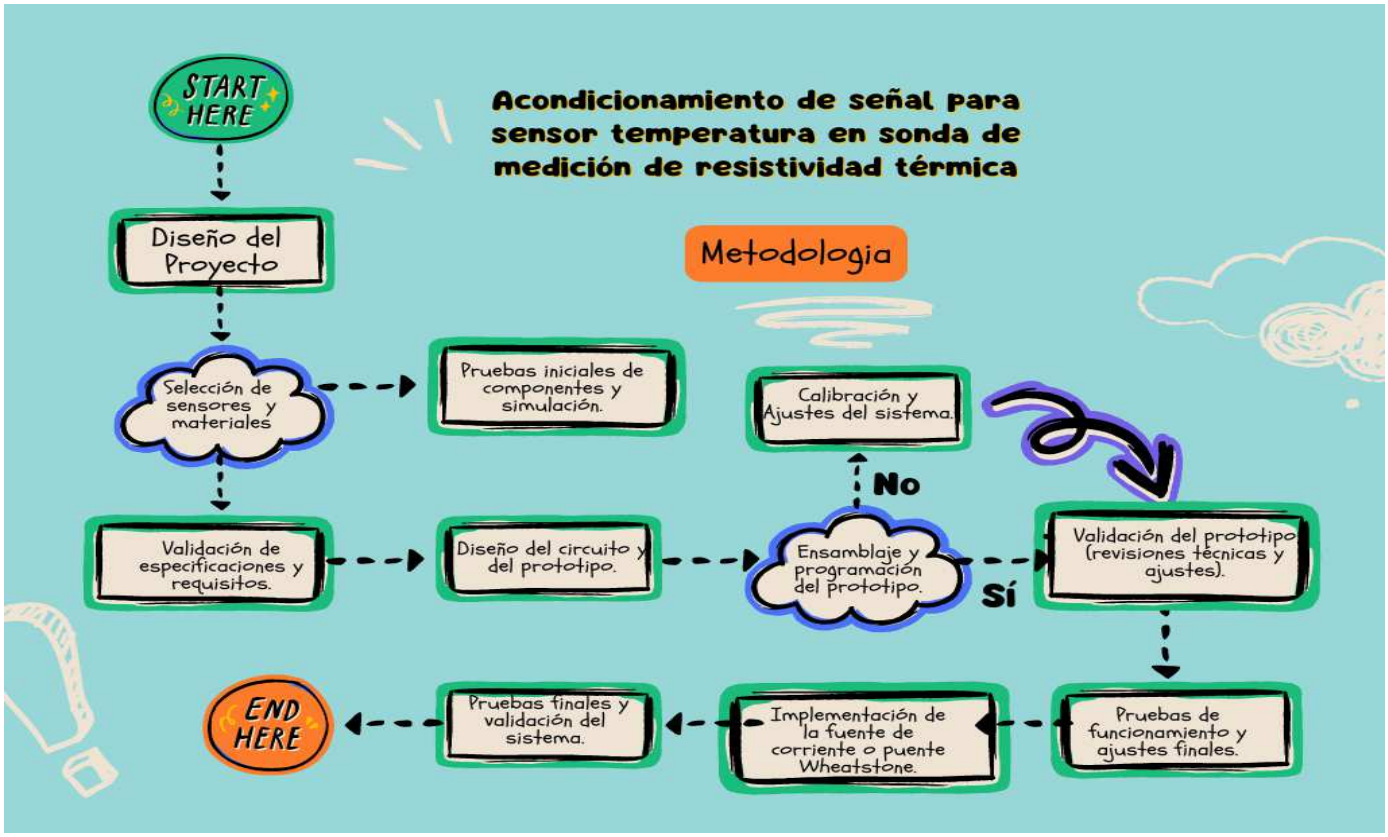


Figura. Diagrama de flujo propuesto *(Elaboración propia)*

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 35, pp. 509 - 518.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

3. Circuito acondicionador de señal

Las resistencias de los elementos del sensor pueden oscilar entre menos de 100 Ω y varios cientos de kΩ, dependiendo del diseño del sensor y del entorno físico que se vaya a medir. Por ejemplo, los RTD suelen ser 100 Ω o 1000Ω. Estos sensores producen pequeños cambios porcentuales en la resistencia en respuesta a un cambio en una variable física, la temperatura. Los RTD de platino, como el PT100, tienen un coeficiente de temperatura de aproximadamente 0,385%/°C. Por lo tanto, medir con precisión estos pequeños cambios de resistencia es fundamental cuando se aplican sensores resistivos. Además, de un circuito que nos dé una señal de voltaje dependiente del valor de la resistencia.

2.1 Puente de Wheatstone para RTD de tres terminales

Los puentes de medición ofrecen una alternativa atractiva para medir con precisión pequeños cambios de resistencia. Son sencillos de implementar, confiables, con pocos componentes y baratos. El puente básico de Wheatstone (desarrollado por S. H. Christie en 1833). Para un PT100 de tres terminales, el circuito se muestra en la Figura 1. Consta de cuatro resistencias conectadas para formar un cuadrilátero, una fuente de excitación (voltaje o corriente) conectada a través de una de las diagonales y un detector de voltaje conectado a través de la otra diagonal. El detector mide la diferencia entre las salidas de dos divisores de voltaje conectados a través de la excitación. El análisis del circuito se realiza con teoremas de circuitos eléctricos básicos y se puede revisar en [1,3]. Este arreglo presenta el problema de que añade suma la resistencia de los cables. Nosotros usamos R_1= 110 Ω; R_2= 1 kΩ; R_3= 1 kΩ;

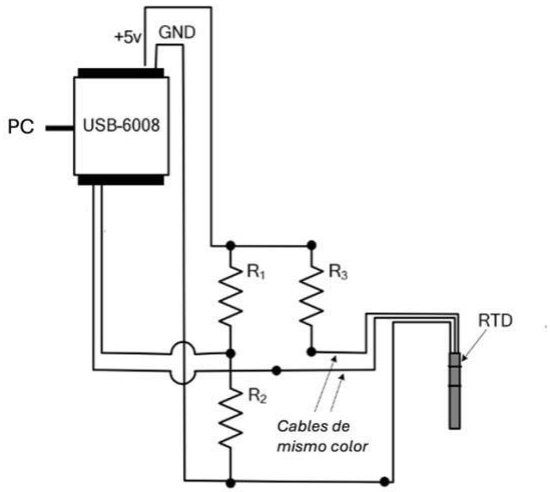


Figura 1. Puente de Wheatstone, RTD y DAQ. *(Elaboración propia)*

En la Figura 2. Se muestra el dispositivo implementado. En la imagen observa la tarjeta de adquisición utilizada, así como: el sensor PT100 , y el arreglo de resistencias que forman el puente de medición.

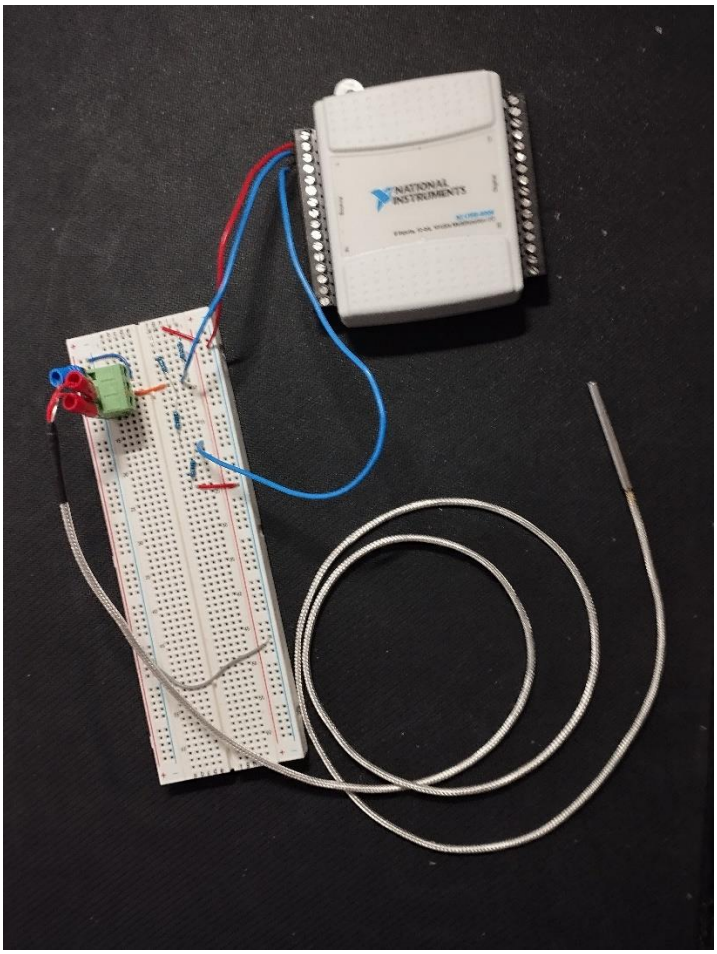


Figura 2. Puente de Wheatstone, RTD y DAQ. Implementación. *(Elaboración propia)*

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 35, pp. 509 - 518.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

2.2 Circuito con fuente de corriente constante

Para compensar la resistencia del cable en la configuración de tres cables, alimentamos el sensor con una fuente de corriente constante, basada en un transistor y un amplificador de instrumentación. La disposición detallada del circuito que se implementa se muestra el esquema de la Figura 3. El circuito consta de un amplificador de instrumentación, un y transistor, un, además de un divisor de voltaje convencional para ajustar la corriente. Nosotros ajustamos el circuito para tener una corriente constante de 8mA. El análisis del circuito se puede revisar en [4,9]. Al utilizar la fuente decorriente constante eliminamos las resistencias de los cables. Esta resistencia una fuente de error para sensores con cables largos.

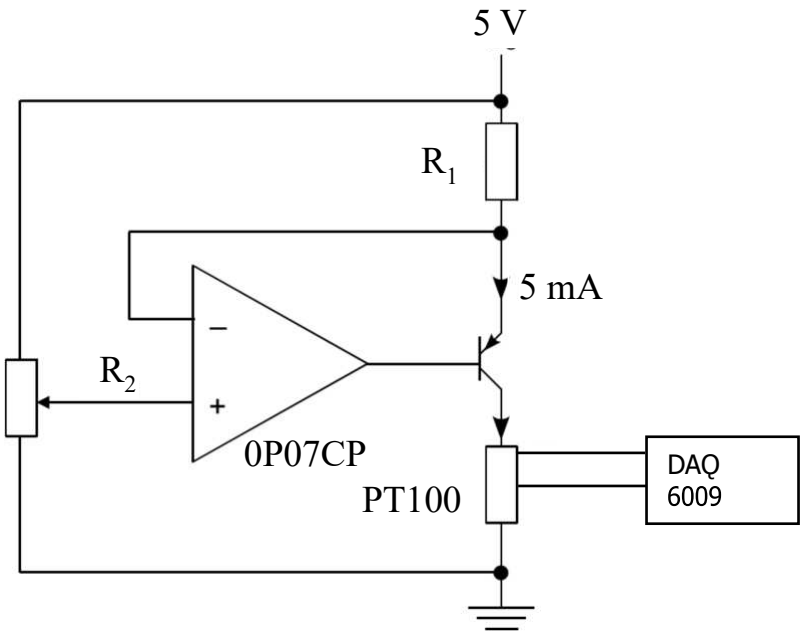


Figura 3. Circuito Acondicionador de señal, RTD y DAQ. *(Elaboración propia)*

En la Figura 4. Se muestra el dispositivo implementado. En la imagen observa la tarjeta de adquisición utilizada, así como: el sensor PT100 , y la fuente de corriente constante el arreglo de amplificadores operacionales.

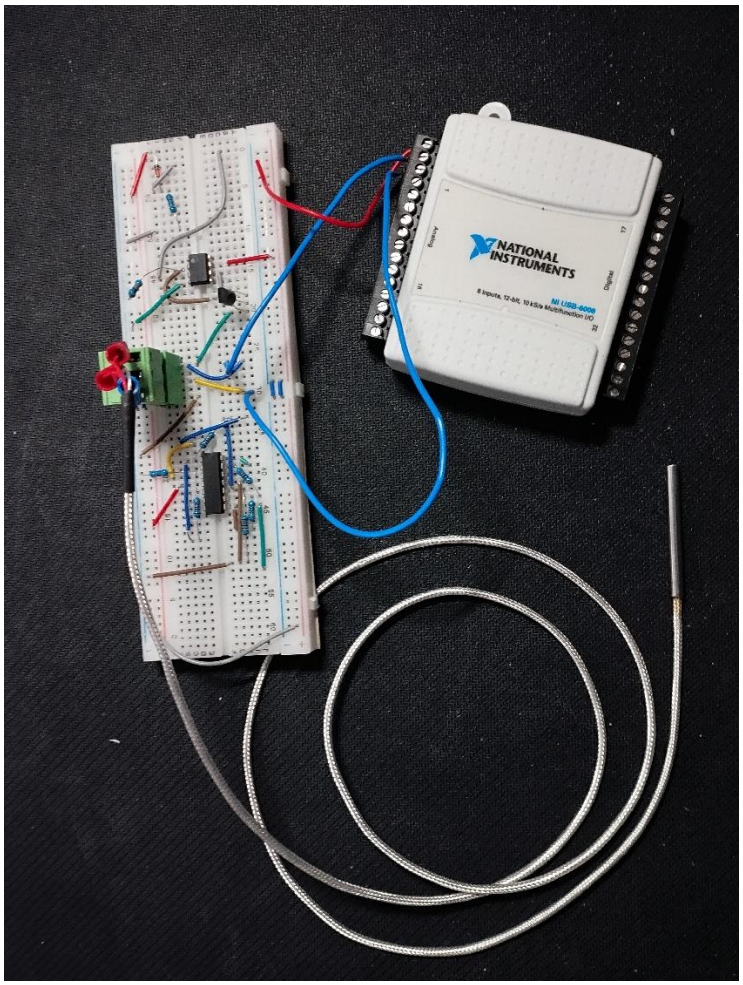


Figura 4. Circuito Acondicionador de señal, RTD y DAQ. *(Elaboración propia)*

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 35, pp. 509 - 518.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

3.Resultados

Implementamos los circuitos acondicionadores de señal y realizamos mediciones la medición de temperaturas cercanas *0°C y 100°C*. A saber, agua con hielo y agua hirviendo. Utilizamos una tarjeta de adquisición de datos DAQ 6008 para capturar los datos. Aunque realizamos mediciones con diferentes tasas de adquisición de datos, no observamos cambios significativos y optamos por seleccionar 100 muestras/seg.

Primero, en la Figura 3. La gráfica muestra datos en el que se mide de temperatura del agua vs muestras. Inicialmente, se registran la temperatura ambiente, luego el sensor se sumerge en aguan helada y se observa el transitorio térmico, para luego descender y se estabilizarse alrededor de 0°C. El objetivo es analizar la temperatura del agua con hielo utilizando un circuito de acondicionamiento basado en un puente de Wheatstone. Adicionalmente se midió la temperatura del agua con hielo con un termopar tipo K en un multímetro digital. En el multímetro digital medimos 1°C. Entonces, de las mediciones que obtuvimos con el puente y el termopar observamos una buena correlación.

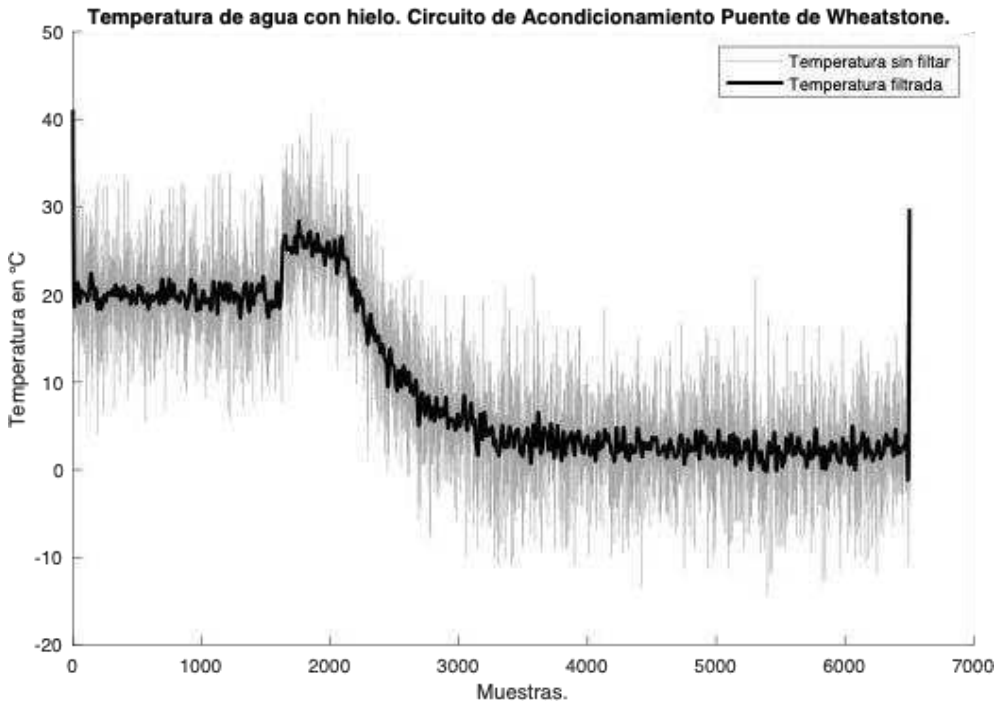


Figura 3. Medición con puente de Wheatstone en agua con hielo *(Elaboración propia)*

En al Figura 4. Al inicio de la captura de datos, observamos que la temperatura se encuentra alrededor de 100°C y se observa una ligera tendencia descendente a medida que se toman más muestras y el tiempo transcurre. Indicándonos como el sensor se estabiliza. Hay fluctuaciones en las lecturas sin filtro, propias de este tipo de sensores. Mientras que la línea filtrada mantiene un comportamiento más constante y progresivamente descendente. Alrededor de la muestra 2000, se observa una caída brusca en la temperatura filtrada, que indica el final del experimento, apagando la alimentación de sensor.

La gráfica sugiere que se está midiendo la temperatura de agua caliente que inicialmente se encuentra cerca del punto de ebullición (100°C). La ligera disminución de la temperatura podría deberse a la pérdida de calor y la estabilización del sistema. La curva sin filtrar muestra las lecturas en bruto, mientras que la curva con filtro indica cómo se suaviza la señal mediante el circuito de acondicionamiento del puente de Wheatstone.

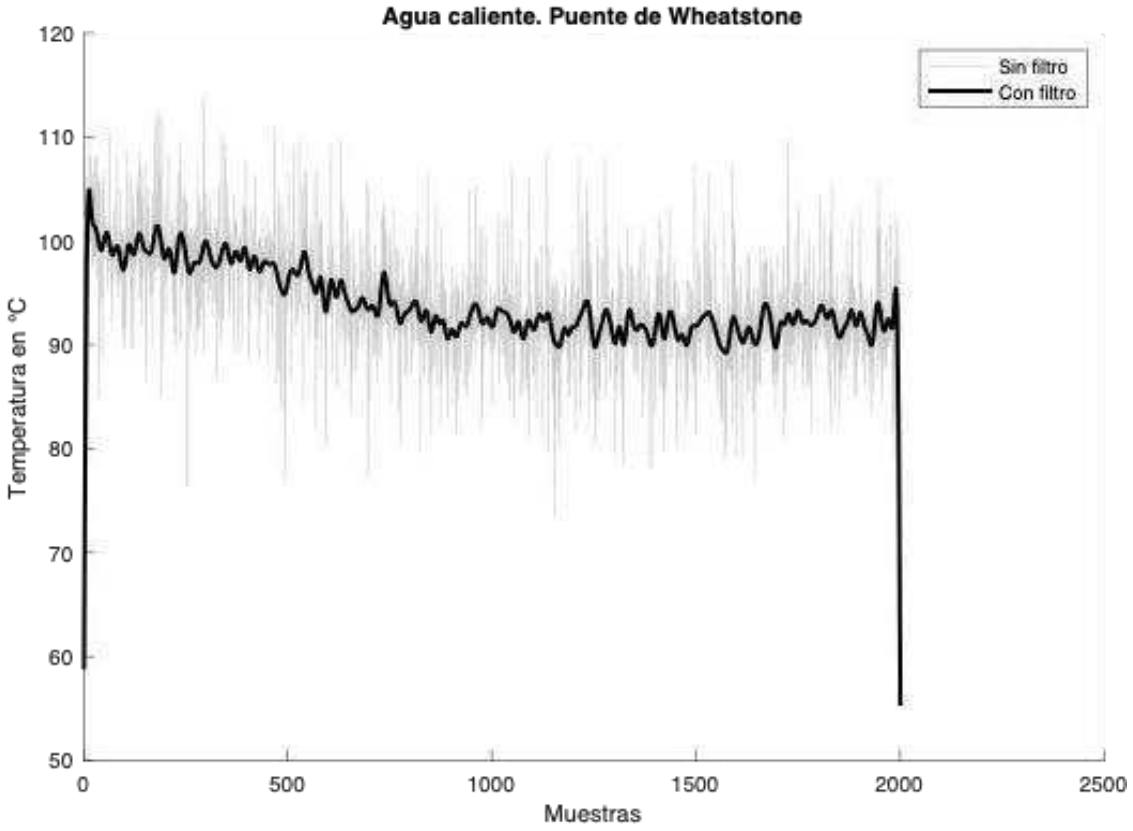


Figura 4. Medición con puente de Wheatstone en agua caliente, cercana al punto de ebullición.
(Elaboración propia)

En la Figura 5 y 6, se utilizó el circuito de la Figura. Al inicio (muestras de 0 a 100), la resistencia es alta, con valores alrededor de 100.5 Ω, y muestra variaciones significativas. Estas variaciones las atribuimos a la manipulación del sensor. Entre las muestras 100 y 120, hay una caída abrupta en la resistencia, que se estabiliza alrededor de 100 Ω. Valor teórico del sensor PT100 a 0°C. Después de lacaída, la resistencia se mantiene constante en valores cercanos a 100 Ω, con pequeñas oscilaciones. A partir de la muestra 120, la curva filtrada es mucho más estable, indicando que el sistema ha alcanzado una condición constante.

El gráfico de la Figura 6. Presenta la medición de la temperatura. La caída abrupta de la resistencia y su correspondiente medición de temperatura establece el inicio de una condición de corriente constante.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 35, pp. 509 - 518.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

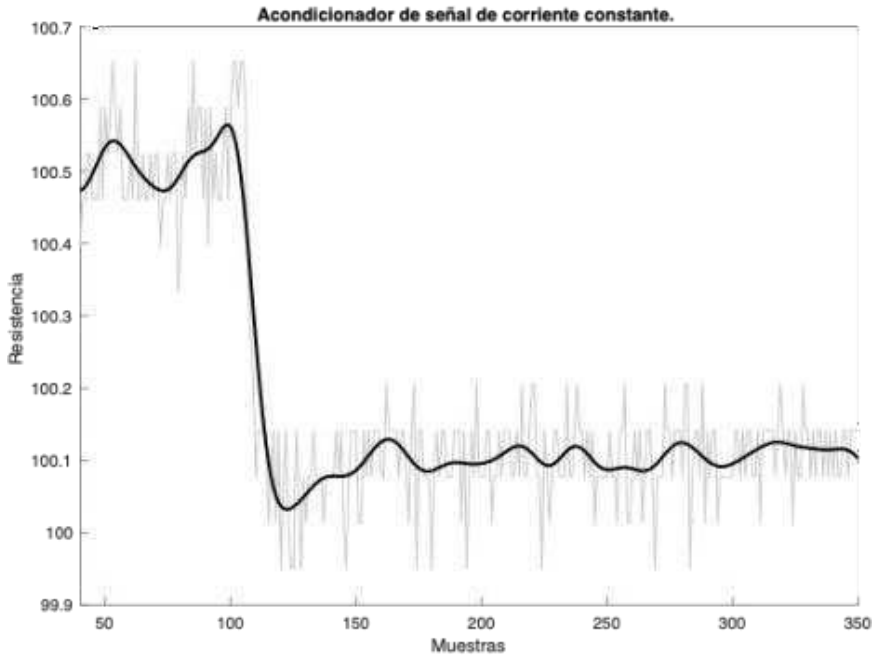


Figura 5. Medición de la Resistencia del sensorPT100. Agua con hielo. *(Elaboración propia)*

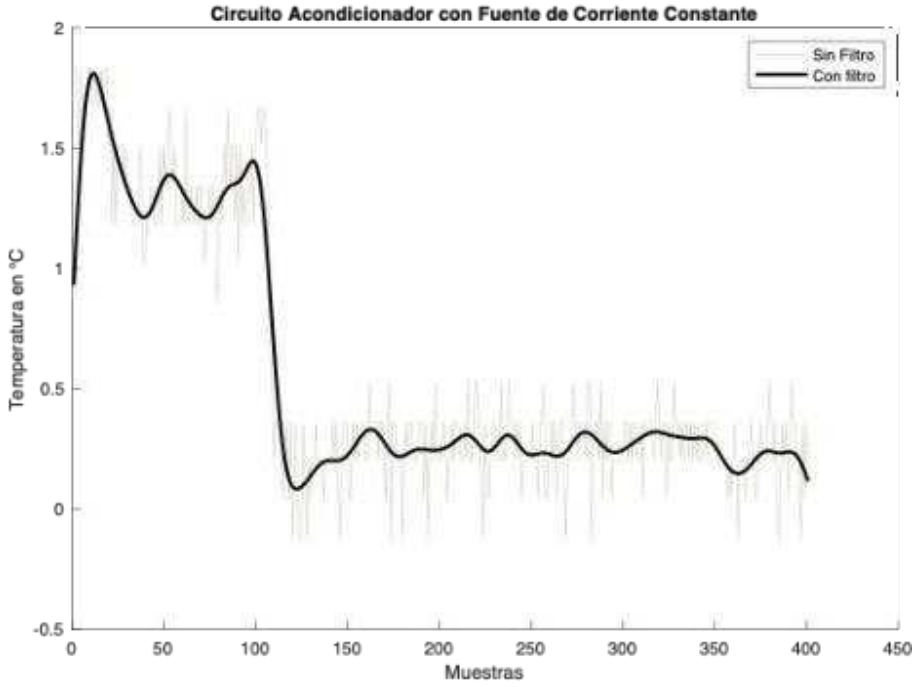


Figura 6. Medición de la Temperatura del sensorPT100. Agua con hielo. *(Elaboración propia)*

4. Conclusiones

Se implementaron dos circuitos para acondicionar la señal de un sensor termo resistivo, un PT100. Se realizaron ejercicios en temperaturas cercanas a 0°c y 100 °C para medir temperatura y resistenciadel sensor. Los datos fueron capturados usando una tarjeta de adquisición de datos DAQ 6008. De los resultados observamos que las mediciones dada por ambos circuitos acondicionadores son muy cercanas a las teóricas. Implementar una fuente de corriente constante para nuestra aplicación no es necesario ya que la resistencia de los cables no es significativa, ya que la longitud de los cables en de 1m. Que ambos circuitos requieren de un filtro pasa bajas para filtrar el ruido propio de los sensores. Así pues, concluimos que, por su sencilles, facilidad de implementación y por las mediciones que obtuvimosel circuito de puente de Wheatstone es nuestra mejor opción. Los autores agradecemos al TecnológicoNacional de México/Instituto Tecnológico de Querétaro por las facilidades prestadas y al Programa de Jóvenes Talentos Científicos y tecnológicos del Estado de Querétaro.
.

Referencias

[1] L. Bengtsson. “Measurement Techniques For the Physics Laboratory”. Springer 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8187-8
[2] Piechowski, L.; Muc, A.; Iwaszkiewicz, J. The Precise Temperature Measurement System with Compensation of Measuring Cable Influence. Energies 2021, 14, 8214. https://doi.org/10.3390/en14248214”.
[3] B. Northrop. “Instrumentation and Measurement “CRC Press. 2014.

[4] S. Pradhan and S. Sen, An “Improved Lead Compensation Technique for Three-Wire Resistance Temperature Detectors” IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 48, NO. 5, OCTOBER 1999

[5] IEEE Std 442TM-2017. IEEE Guide for Thermal Resistivity Measurements of Soils and Backfill Materials United States of America. 2018.

[6] A. Dali Naidu, D.N. Singh. A generalized procedure for determining thermal resistivity of soils International Journal of Thermal Sciences 43 (2004) 43–51. doi:10.1016/S1290-0729(03)00103-0

[7] D. N Singh. S. Kuriyan. K. Manthena. “A generalized relations between soil electrica and thermal resistivities” Experimental Thermal and Fluid Science. 2011. 175-181

[8] Li, W.; Xiong, S.; Zhou, X. Lead-Wire-Resistance Compensation Technique Using a Single Zener Diode for Two-Wire ResistanceTemperature Detectors (RTDs). Sensors 2020, 20, 2742.

[9] J. Fraden. “Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications”. Springer. Switzerland. 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-19303-8

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 36, pp. 519 - 535.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Prototipo Reconfigurable de Microsatélite Meteorológico CanSat

Maganda Carvajal Jaime Alberto[1]✉, Pérez Orozco Juan Adrián[1], Cervantes Gloria Omar[1], Mejía Hernández Guillermo Eduardo[1], Beltrán Medina Paulina Karely[2], Castillo Hipólito Astrid Onasis[1], Acevedo Avonce Diego Pablo[1], Alcantar Pérez Héctor Manuel[1], Rivera Díaz Mariana Isabel[1].

[1]Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Querétaro Campus Norte.
[2]Universidad Tecnológica de Querétaro.
jaime.mc@queretaro.tecnm.mx

Resumen

El proyecto del prototipo de microsatélite meteorológico CanSat tuvo como objetivo el diseño, construcción y lanzamiento de un dispositivo mecatrónico diseñado para simular algunos de los subsistemas de un satélite real, con dimensiones similares a las de una lata de refresco y permitiendo ajustes y mejoras según las necesidades del proyecto. Se obtuvieron diferentes datos meteorológicos y alturas, lo cual fue posible gracias a la programación de diversos sensores de temperatura, aceleración, altitud, presión y almacenamiento de datos, que ayudaron a capturar y resguardar la información.

Aunque estos microsatélites no están destinados a ser puestos en órbita, ofrecen una representación práctica de los dispositivos espaciales. El CanSat emplea sensores analógicos y digitales junto con un microprocesador Arduino ESP32 para almacenar y procesar datos, los cuales se analizaron posteriormente en programas como MATLAB para entender su comportamiento.

Palabras clave: Microsatélite CanSat, Diseño Asistido por Computadora, Microcontroladores, Tecnología espacial, reconfigurable y económico.

1. Introducción

Los microsatélites meteorológicos, conocidos como CanSat, representan una innovación significativa en el campo de la tecnología aeroespacial y la educación científica. Estos dispositivos mecatrónicos, cuyo nombre deriva de su tamaño comparable al de una lata de refresco, tienen como objetivo principal simular los componentes y funciones de un satélite real. Aunque no están diseñados para ser puestos en órbita, los CanSat son lanzados desde alturas que varían desde unos cientos de metros hasta varias decenas de kilómetros, utilizando cohetes, globos o vehículos aéreos no tripulados (VANT). Durante su descenso, estos microsatélites ejecutan diversas misiones, recopilando y transmitiendo datos a estaciones terrestres [1].

El concepto de los CanSat se originó como una herramienta educativa para proporcionar a los estudiantes de la tecnología espacial una experiencia práctica en el diseño, construcción y operación de satélites. A diferencia de los satélites convencionales, los CanSat están construidos con componentes electrónicos comerciales, lo que los hace accesibles y económicos. Esta accesibilidad permite a los participantes aprender sobre las metodologías de gestión y ejecución de misiones espaciales, incluyendo la definición de objetivos, el diseño y la construcción del satélite, su lanzamiento, despliegue y la recopilación y procesamiento de datos [2].

Los antecedentes de los CanSat se remontan a la era de los primeros satélites artificiales. El lanzamiento del Sputnik I por la Unión Soviética en 1957 marcó el inicio de la exploración espacial y sentó las bases para el desarrollo de tecnologías satelitales. Desde entonces, los satélites han evolucionado significativamente, tanto en términos de tamaño como de funcionalidad. Los satélites grandes y costosos

han sido complementados por satélites más pequeños y económicos, conocidos como picosatélites y nanosatélites, que han ampliado las posibilidades de investigación y aplicación en diversas áreas, incluyendo la meteorología [3].

Instituciones académicas y programas espaciales universitarios han adoptado estos microsatélites como parte de sus currículos, permitiendo a los estudiantes participar en competiciones y proyectos que simulan misiones espaciales reales. Por ejemplo, el Programa Espacial Universitario de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ha desarrollado iniciativas para la construcción y lanzamiento de CanSat, fomentando el interés y la formación en tecnología espacial entre los jóvenes [4].

Además de su valor educativo, los CanSat también han encontrado aplicaciones en la investigación científica. Estos microsatélites pueden equiparse con una variedad de sensores para medir magnitudes físicas y químicas, como la presión, la temperatura y la composición del aire. Esta capacidad de recopilación de datos en tiempo real los convierte en herramientas útiles para estudios meteorológicos y ambientales. Aunque los CanSat no están diseñados para misiones de larga duración o para operar en el espacio exterior, su capacidad para realizar mediciones precisas durante su breve descenso los hace valiosos para experimentos y pruebas preliminares [1].

2. Metodología

La creación de un microsatélite meteorológico CanSat es un proyecto que, aunque presenta un nivel de complejidad, puede abordarse mediante una metodología bien definida. Para lograr la creación adecuada del proyecto, es esencial entender previamente el problema a resolver, al igual que funciones y requisitos que se deban de cumplir [5].
Establecimiento de los requerimientos:

La finalidad del desarrollo del prototipo del microsatélite meteorológico CanSat es que sea accesible en cuanto a adquisición y costo, que permita la recolección de ciertos parámetros meteorológicos. Se busca que el dispositivo pueda obtener datos de temperatura, humedad, presión, altitud y aceleración, por lo que la correcta selección de sensores es importante. En caso de que no se tenga certeza de que los datos son totalmente correctos, se hará una comparación con datos proporcionados en páginas oficiales.

A continuación, se describen los pasos generales a seguir para la integración de la misma:

- ✓ Definición del proyecto : La problemática a solucionar con esta integración electrónica es poner al alcance de las personas un satélite enlatado CanSat de bajo coste que permita la recolección de parámetros meteorológicos de manera precisa y exacta en medida de lo posible, para la medición de la temperatura, humedad y presión; es importante simplificar la cantidad de sensores utilizados para reducir tanto el consumo energético como el espacio utilizado, pero sin dejar de lado la fiabilidad en las medidas y el coste económico del prototipo final. Para calibrar los dispositivos, si fuera necesario se opta por recurrir a la comparación de las lecturas con sistemas de referencia.

- ✓ Selección del material y sensores a utilizar: Se deben seleccionar los componentes necesarios para construir el prototipo de medición de variables atmosféricas, lo que incluye la selección de sensores como: DHT11, BMP180, MPU6050, RTC DS1307, un datalogger y un dispositivo ESP32, capaz de ser compatibles y armonioso con los sensores y el diseño, así como insumos para la construcción del mismo.

- ✓ Diseño del electrónico: Dentro del diseño del CANSAT, es importante mencionar que la mayoría de los sensores se rigen bajo el funcionamiento del protocolo I^2C, protocolo de comunicación serial que resulta de gran apoyo en la recolección de datos de más de un sensor sin necesidad del uso de más puertos del microcontrolador ESP32; resumidamente, con el uso del protocolo I2C se pretende el uso de cuatro pines o puertos de los microcontroladores; dos destinados a la alimentación de los sensores, además de otros dos encargados de establecer la comunicación de datos mediante el conocido “SCL” y “SDA”. Tomando esto en cuenta resulta necesario diseñar una impresión 3D que pueda ajustarse a una lata, permitiendo la integración de sensores o componentes. Además, se debe considerar la posibilidad de futuras actualizaciones o mejoras del

prototipo, con el fin de minimizar el uso de cables, optimizar el espacio y lograr un montaje final más compacto.

- ✓ Desarrollo del prototipo: Se deben ensamblar los componentes o los sensores necesarios a la impresión que previamente se le hizo un espacio para fijarlos. Incluso se hace un espacio adecuado a los componentes extras para el funcionamiento correcto del dispositivo. Todo lo anterior será acomodado en una estructura que consta de 3 niveles; los componentes de sensado serán ensamblados en el nivel superior destinado únicamente a sensado; mientras que la alimentación y control del prototipo se ubicarán en el nivel más inferior

- ✓ Programación del prototipo: Se debe de elaborar un programa, en este caso en la aplicación IDE de Arduino, en el que realicemos la integración entre los sensores para que realice las especificaciones en los requerimientos. Esto anterior pretende funcionar como se explico anteriormente, mediante el uso del protocolo I2C, pues algunos elementos de sensado funcionan a partir de este protocolo

- ✓ Pruebas y ajustes: Se debe de realizar las pruebas necesarias para que exista una verificación de que nuestro dispositivo de las mediciones requeridas de forma adecuada, comprobando así que correcto funcionamiento. De ser necesario hacer más mejoras en caso de que se requiera.

- ✓ Impresión y ensamblaje: En última instancia, se debe incorporar el prototipo en el entorno en el que se van a hacer las muestras y verificar nuevamente las mediciones obtenidas para que no exista un error en la lectura o programación implementada.

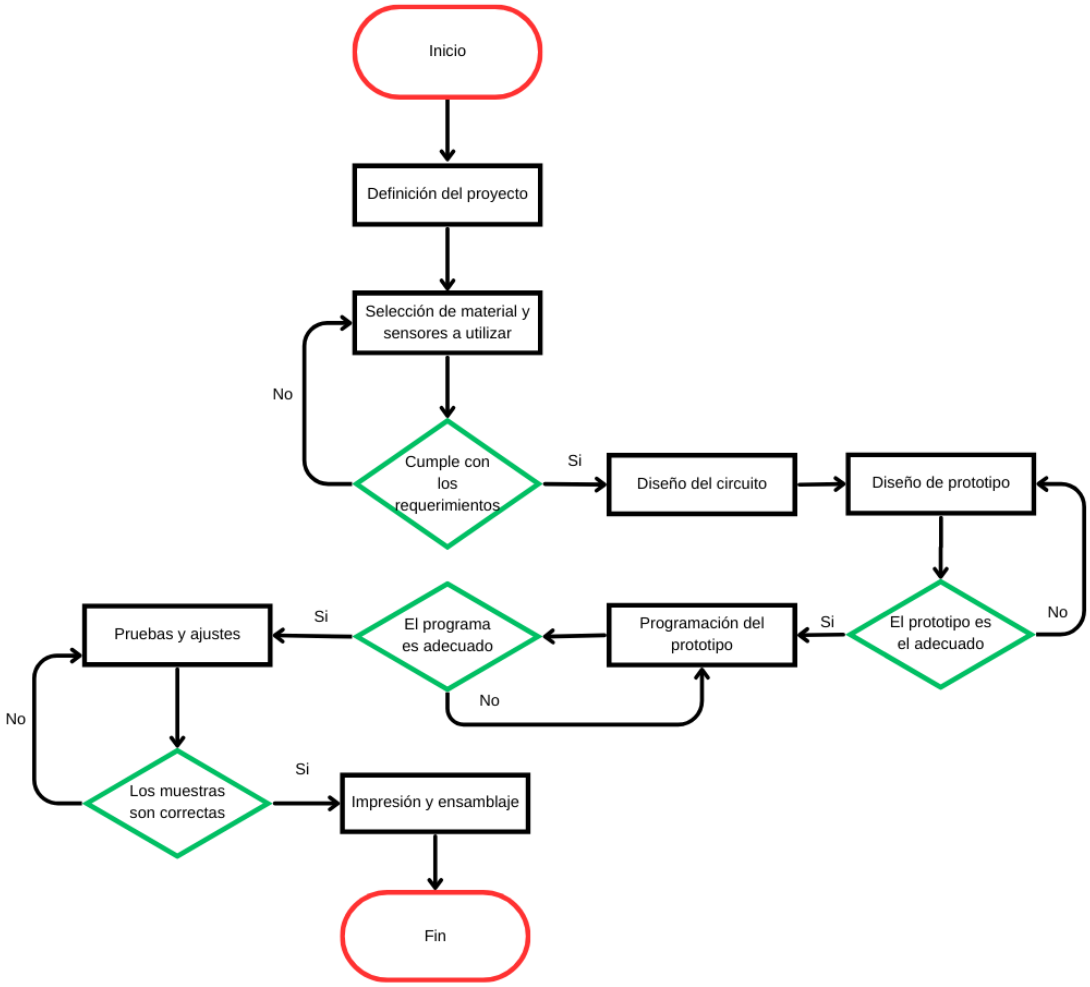


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodologia propuesta *(Elaboración propia)*

.

3. Desarrollo del prototipo

Se consideraron los siguientes requerimientos para la elaboración del prototipo CanSat:

3.1 Descripción de la problemática

Aplicar los conocimientos adquiridos en las materias de Instrumentación, Control, Electrónica de potencia, Mecanismos, Tópicos avanzados de diseño mecánico, por mencionar algunas, con lo cual los estudiantes del ITQ CAMPUS NORTE de la carrera de mecatrónica puedan formar un equipo no mayor a 6 integrantes y fabricar un satélite enlatado CANSAT, con el cual puedan obtener y transmitir información meteorológica a una altura no mayor de 400 metros.

3.2 Objetivo del *prototipo*

Integrar, programar y desarrollar un prototipo CanSat con sensores y materiales que estuvieran al alcance de los estudiantes que se pudieran conseguir en la región, con lo cual fuera posible realizar la adquisición y el manejo de datos meteorológicos en tiempo real.

Propuesta de controlador y módulos a utilizar:

- ✓ ***ESP32***
  Actualmente el controlador ESP32 tiene un mejor precio en el mercado frente a arduino, además ofrece ciertas ventajas como un tamaño mas compacto, módulo bluetooth y wifi incluidos
- ✓ ***BMP180***
  El sensor BMP180 resulta una buena opción para el desarrollo del CANSAT, esto gracias a que el sensor no solo puede tomar lecturas de presión atmosférica, puede tomar lecturas también de la altura a nivel del mar en donde se encuentra y lecturas sobre la temperatura en la zona
- ✓ ***DHT11***
  A pesar de que este sensor puede tomar lectura sobre temperatura en un lugar, lo que llama la atención y la utilidad que se le dará al sensor es la toma de lectura de humedad mientras el CANSAT asciende
- ✓ ***MPU6050***
  Este sensor pretende tomar lecturas sobre el cambio de velocidad a lo largo del tiempo tanto cuando ascenderá el CANSAT como para el momento de su descenso, además de recabar datos de la posición durante toda la prueba.
- ✓ ***DATALOGGER***
  Con este módulo se pretende realizar el guardado de los datos recolectados mediante.
- ✓ ***Propuesta de etapa de potencia***
  La alimentación del dispositivo consistirá en el uso de un módulo de fuente de alimentación para proto, el cuál será alimentado mediante el uso de 2 baterías de 9 volts conectadas en paralelo para de esta manera se asegure un tiempo prolongado de captura de datos, de este módulo de fuente de alimentación se pretende conectar el cable USB que corresponde a la placa ESP32 para poder energizar todo el sistema.

3.3 Requisitos del prototipo

3.3.1 Integración del prototipo

- Comunicación I^2C: Es un protocolo de comunicación serial desarrollado por Phillips Semiconductors en la década de los 80s. Funciona con una arquitectura maestro-esclavo (master-slave), donde existen dos tipos de dispositivos [6]:
  - ✓ Maestro (Master) o Controlador (Controller): son los que inician y coordinan la

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 36, pp. 519 - 535.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

comunicación.

- ✓ Esclavos (Slave) o Periféricos (Peripheral): son los dispositivos que están a la espera de que algún maestro se comunique con ellos. Casos comunes son los sensores y actuadores que soportan este protocolo, aunque también es posible, y en ocasiones necesario, que un microcontrolador se comporte como un esclavo. En la figura 2 se aprecia el esquema de conexión habitual para conectar dispositivos empleando el protocolo I²C.

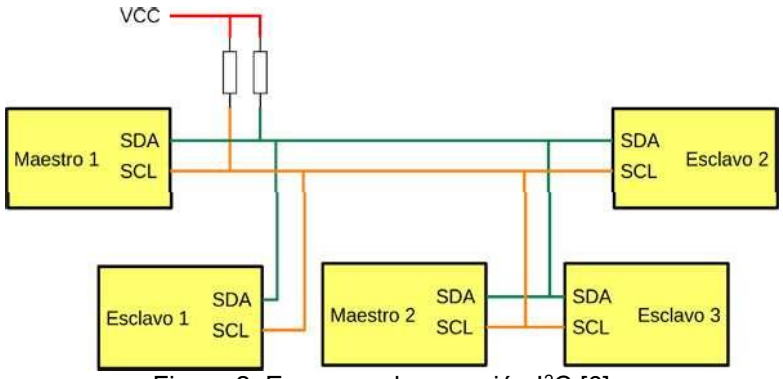


Figura 2. Esquema de conexión I²C [6].

Únicamente se precisa de dos pines para la comunicación, es decir, todos los dispositivos se conectan a los mismos cables: SDA (Serial Data): utilizado para el intercambio de datos. SCL (Serial Clock): empleado como señal de reloj. Se destaca la importancia de las resistencias Pull-up ubicado en ambos pines, gracias a estas la comunicación funciona correctamente, ya que el I²C es un bus de colector abierto. La velocidad de comunicación de datos va de 100 kbps hasta 3,4Mbps [7].

3.3.2 Selección de los sensores

- Sensores: para este caso en particular se usaron los siguientes:
  - ✓ Reloj en tiempo Real

    El reloj en tiempo real (RTC) en serie DS1307 es un reloj/calendario de baja potencia (figura 3). El reloj/calendario proporciona información de segundos, minutos, horas, día, fecha, mes y año. La fecha de fin de mes se ajusta automáticamente para los meses con menos de 31 días, incluyendo correcciones para el año bisiesto. El reloj funciona en formato de 24 horas o de 12 horas con indicador AM/PM. El DS1307 tiene un circuito de detección de energía integrado que detecta los fallos de alimentación y cambia automáticamente a la fuente de alimentación de reserva. El funcionamiento del reloj continúa mientras la pieza funciona con la fuente de alimentación de reserva [8].

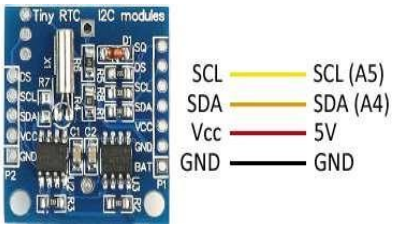


Figura 3. RTC módulo DS1307 [8].

  - ✓ Sensor DHT11:

    Utilizar el sensor DHT11 (figura 4) con las plataformas Arduino/Raspberry Pi/NodeMCU es muy sencillo tanto a nivel de software como hardware. A nivel de software se dispone de librerías para Arduino con soporte para el protocolo "Single bus". En cuanto al hardware, solo es necesario conectar el pin VCC de alimentación a 3-5V, el pin GND a Tierra (0V) y el pin de datos a un pin

digital en nuestro Arduino. Si se desea conectar varios sensores DHT11 a un mismo Arduino, cada sensor debe tener su propio pin de datos. Quizá la única desventaja del sensor es que sólo se puede obtener nuevos datos cada 2 segundos. Cada sensor es calibrado en fabrica para obtener unos coeficientes de calibración grabados en su memoria OTP, asegurando alta estabilidad y fiabilidad a lo largo del tiempo [9].

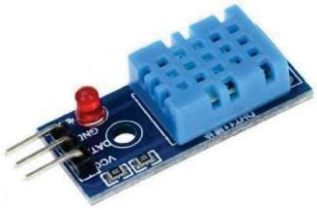


Figura 4. Sensor de humedad y temperatura DHT11 [9].

- ✓ Sensor BMP180

El sensor de presión barométrica BMP180 (figura 5), permite medir la altura respecto al nivel del mar, su funcionamiento está basado en la relación entre presión del aire y la altitud. El BMP180 posee alta precisión y de bajo consumo de energía. Ofrece un rango de medición desde 300 a 1100 hPa (Hecto Pascal), con una precisión absoluta de hasta 0,03 hPa. Basado en tecnología piezo-resistiva de BOSCH con robustez EMC, alta precisión y linealidad, así como con estabilidad a largo plazo. Diseñado para ser conectado directamente a un microcontrolador a través de I2C utilizando solo 2 líneas [10].

Figura 5. Sensor BMP180 [10].

- ✓ Sensor MPU6050

Cuenta con tres convertidores de analógico a digital (ADC) de 16 bits para digitalizar las salidas del giroscopio y tres ADCs de 16 bits para digitalizar las salidas del acelerómetro (figura 6). Para un seguimiento preciso tanto rápido como lento de movimientos, las partes cuentan con un giroscopio programable por el usuario a escala completa de + 250, + 500, + 1000, y + 2000 ° / seg. (Dps) y un rango de escala completa de acelerómetro programable por el usuario de + 2g, + 4g, + 8g y :ñ16g. [11].

Figura 6. Sensor MPU6050 [11].

- ✓ Interfaz del IDE de Arduino
  El IDE de Arduino (figura 8) es un conjunto de herramientas de software que permiten a los programadores desarrollar y grabar todo el código necesario para hacer que la placa Arduino funcione. El IDE de Arduino permite escribir, depurar, editar y grabar el programa (llamados “sketches” en el mundo Arduino) de una manera sumamente sencilla, en gran parte a esto se debe el éxito de Arduino, a su accesibilidad [12].

Figura 8. Interfaz del IDE de Arduino [12].

3.4 Diseño electrónico y simulación

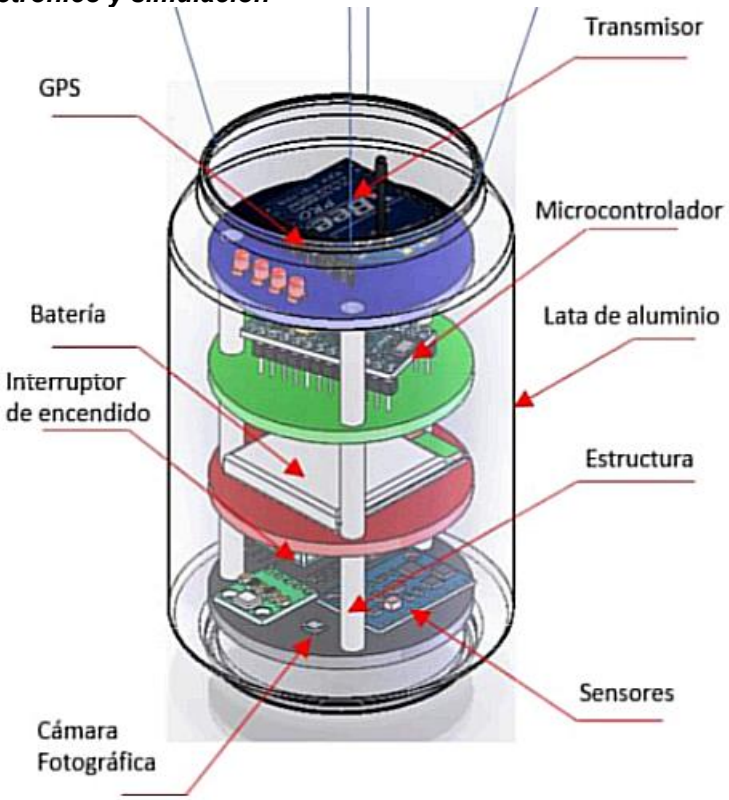


Figura 9. Ejemplo de distribución dentro de cansat [13]

El sistema que irá dentro de la lata puede constar de 4 “niveles” aunque esta cantidad puede ser reducida, en un nivel se colocará el controlador ESP32, en otro la alimentación y en otro los sensores a utilizar. La estructura a utilizar para la colocación de todo el sistema puede crearse mediante impresión 3D.

Tomando como inspiración la figura anterior, los módulos estarán ubicados en la placa más superior, estos módulos serían el BMP180, DHT11, datalogger y MPU6050, en la misma placa superior pero en la parte inferior estaría acomodado el módulo RTC. Las conexiones a realizar serían basadas más que nada en un arreglo de “cascada” para aquellos módulos que requieran conexión I2C mediante puertos SCL y SDA. El controlador ESP32 estaría ubicado una placa perpendicular a la primera placa de abajo hacia arriba, junto a su módulo de alimentación y las baterías de 9V

Acondicionamiento de los sensores

El acondicionamiento de los sensores se realizó mediante prácticas, la comparación de datos obtenidos por medio de las mediciones realizadas independientemente en clase con los datos reales de la zona, ya sea altura, temperatura, humedad, etc. Esta etapa constó de realizar prueba y error constantemente hasta lograr una buena calibración, además de llegar a una repetibilidad que ayude a que la recolección de datos sea óptima.

Diseño de la etapa de potencia

Para el diseño de la etapa de potencia se concluyó que el uso de una batería de 9 volts asegura que el cansat tenga la energía suficiente para la recolección de datos durante su ascenso, su estancia en las alturas y su descenso, por lo que sería necesario hacer un arreglo para que esta batería ahora pueda ser conectada al ESP32 para lograr su alimentación, por lo que el uso de un módulo de fuente de alimentación resulta la opción más adecuada para el CANSAT, la batería se conectaría mediante un conector JACK macho a este módulo de fuente de alimentación y debido a que este módulo cuenta con conexión USB, el cable de alimentación y datos del ESP32 se conectaría a este puerto.

Dimensionamiento

La medida estándar para el desarrollo de este CANSAT se basa en una lata como la siguiente:

Figura 10: Ejemplo de tamaño de lata.

Cuenta con dimensiones de:

- Altura: 107 mm
- Diámetro: 90 mm

Considerando la altura de la lata, cada nivel o placa para insertar los componentes del CANSAT puede estar ubicado c una distancia de 26.7 mm. En cuestión de espacio; la única limitante que se tiene es el diámetro de la lata pues es el único dato fijo para insertar los componentes. Fuera del diámetro y la circunferencia es posible ajustar la altura.

Primeras pruebas

En las primeras pruebas realizadas, se tomaron mediciones con el sensor BMP para tomar evidencia de la variedad de datos que puede recolectar, el resultado de las pruebas consta de mediciones de temperatura, altura a nivel del mar y presión; los resultados se muestran en la siguiente figura

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 36, pp. 519 - 535.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

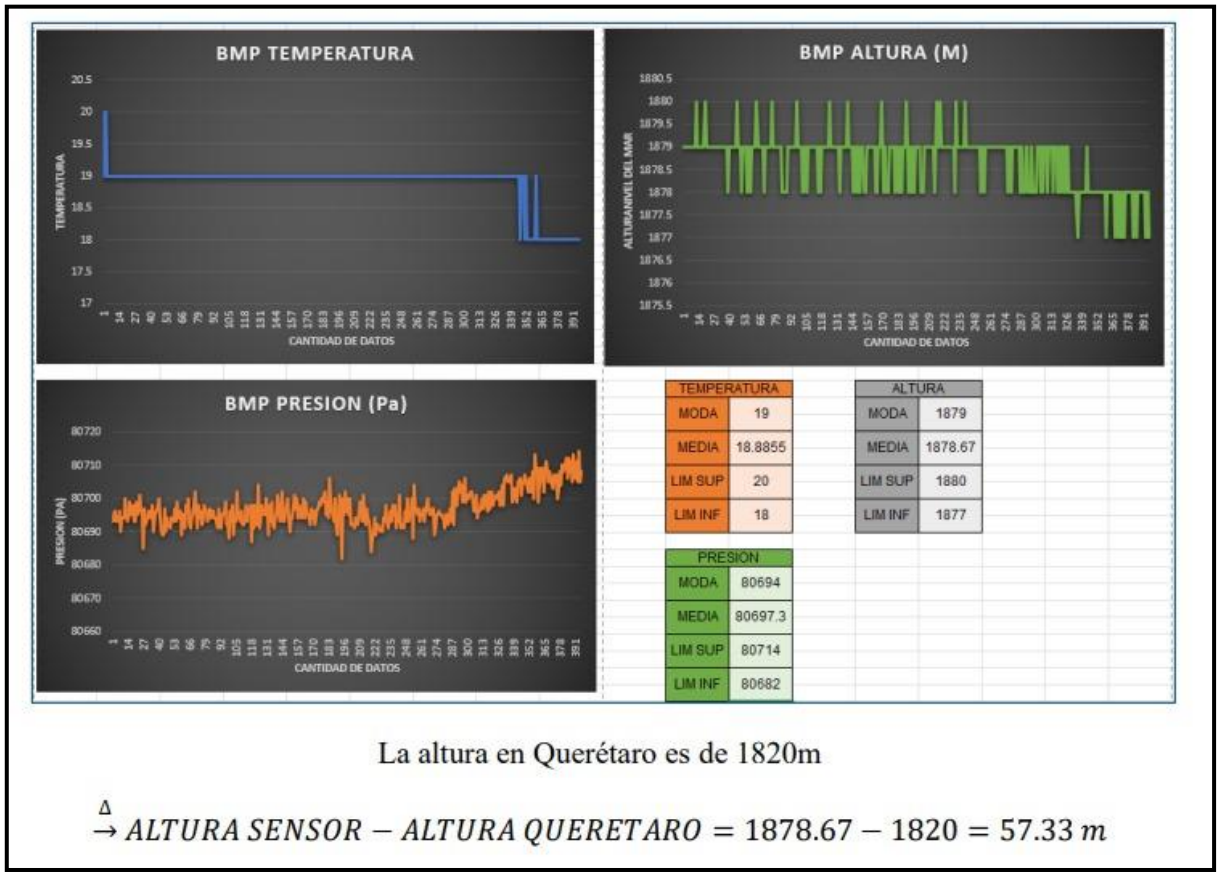


Figura 11. Pruebas preliminares de los sensores a utilizar.

4. Resultados

Modelo electrónico

Para la estructura que llevaría todo el CANSAT se pensó en una estructura modular de acuerdo a las necesidades observadas, por ello el modelo electrónico que se presenta a continuación muestra la distribución que tendrán los módulos y el controlador para el CANSAT a desarrollar:

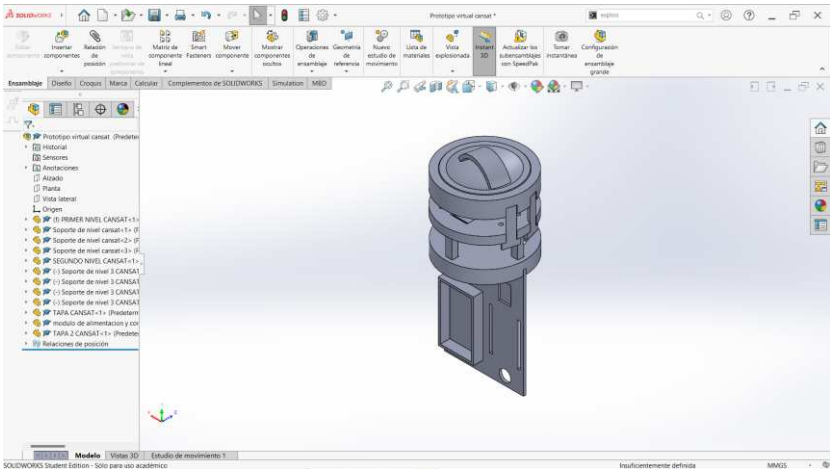


Figura 12. Modelo virtual ensamblado.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 36, pp. 519 - 535.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

El modelo planteado para el cansat consta de 2 niveles, una tapa y un tablero para colocar la fuente de alimentación y la placa esp32, a continuación se explica a detalle en que consiste cada etapa:

- ✓ Etapa de potencia y control

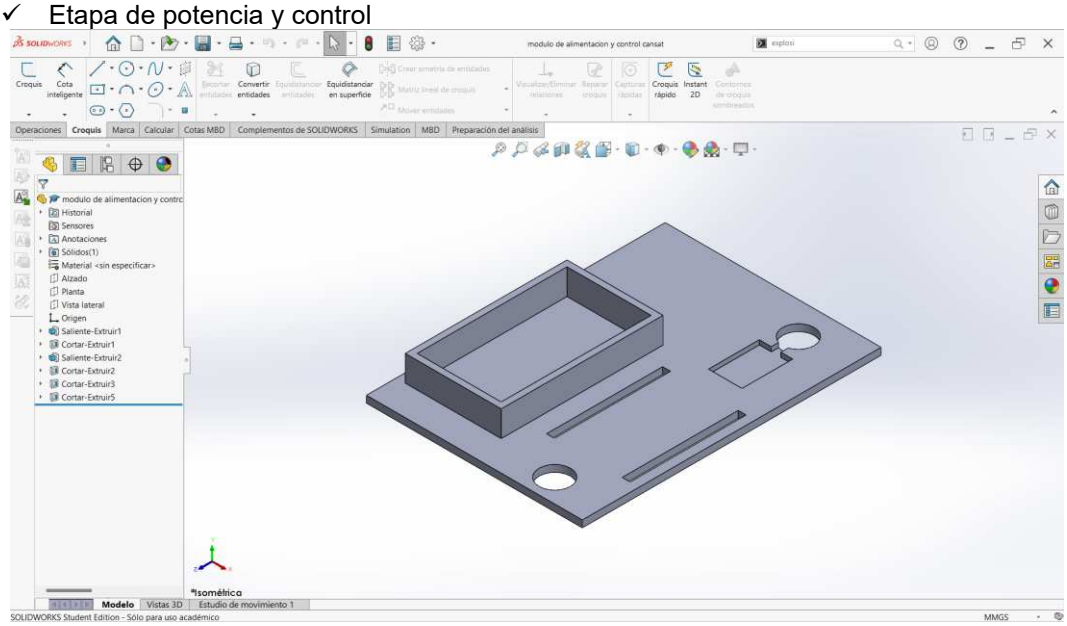


Figura 13. Módulo para etapa de potencia y control.

En este módulo se pretende colocar la fuente de alimentación que suministrará energía a la placa ESP32, además de claramente colocar el ESP32, las perforaciones hechas en la parte superior e inferior tienen como propósito el paso del cable de datos y alimentación del ESP32 por la parte trasera de este módulo.

- ✓ Primer nivel de CANSAT

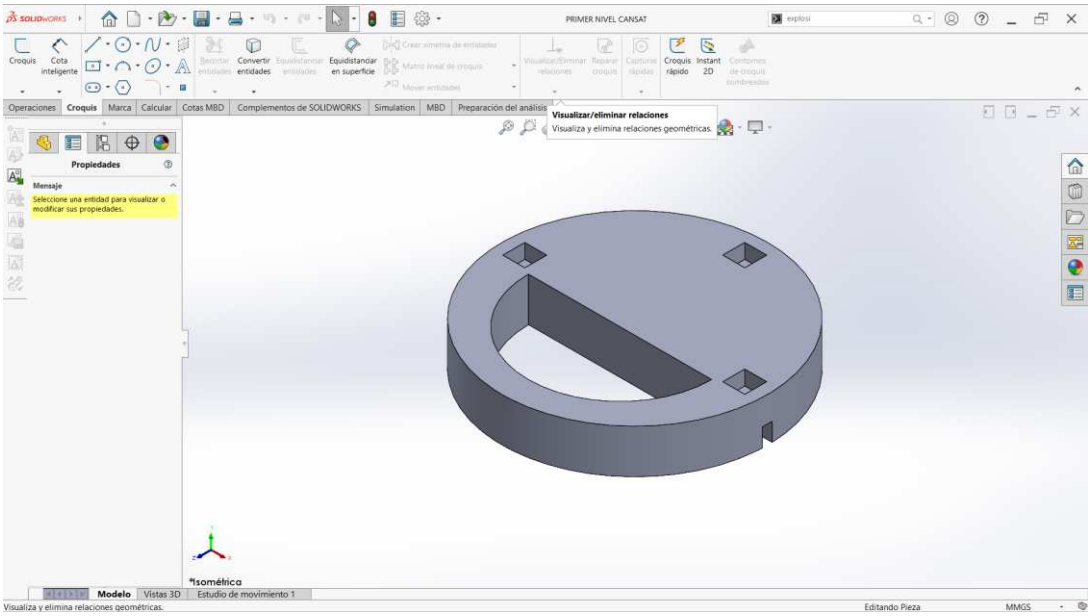


Figura 14. Nivel de conexión de etapa de potencia a etapa de censado.

La idea principal detrás de este módulo es generar un espacio para poder introducir los cables que serán conectados del ESP32 a los módulos, para ello en primera instancia se le dejó un

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 36, pp. 519 - 535.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

"hueco" para poder permitir el paso de los cables a través de este, posteriormente se dejó una muesca en la parte inferior para permitir acoplar el módulo de alimentación y control, por último 3 agujeros cuadrados para permitir el acoplamiento del siguiente nivel.

- ✓ **Módulo de sensores**

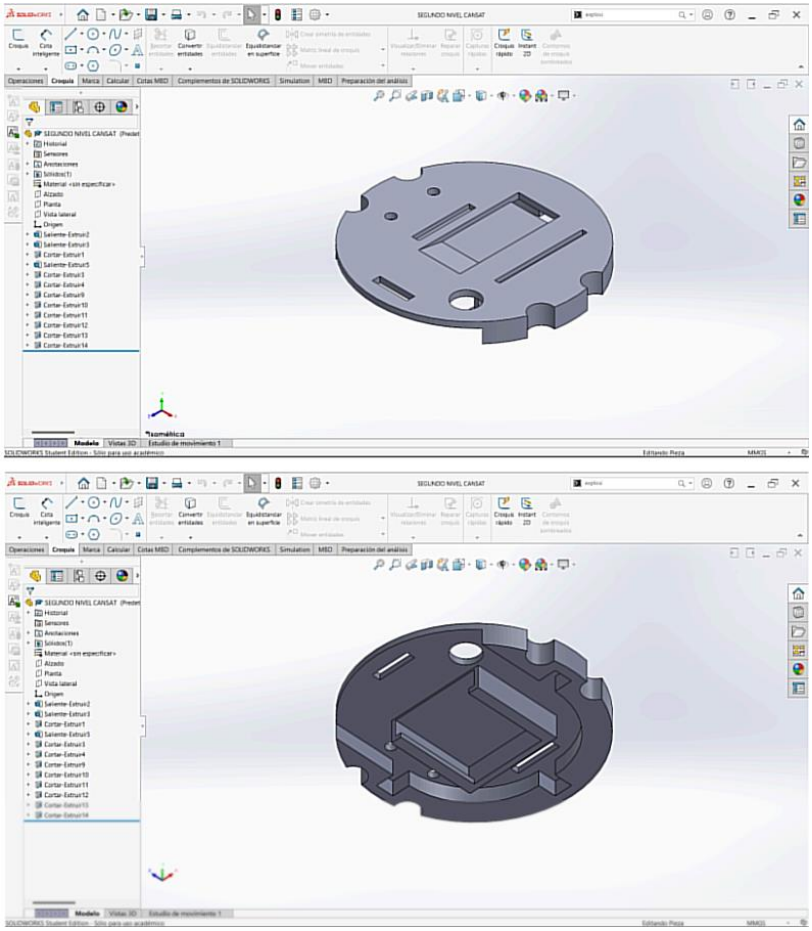


Figura 15. Módulo de sensores.

Este módulo pretende ser aquel donde serán instalados los módulos a usar para recabar los datos, en la parte superior estarán instalados los módulos MPU6050, DHT11, BMP180 y el datalogger, mientras que en la parte inferior estará ubicado el módulo de reloj en tiempo real (RTC)

- ✓ **Tapas**

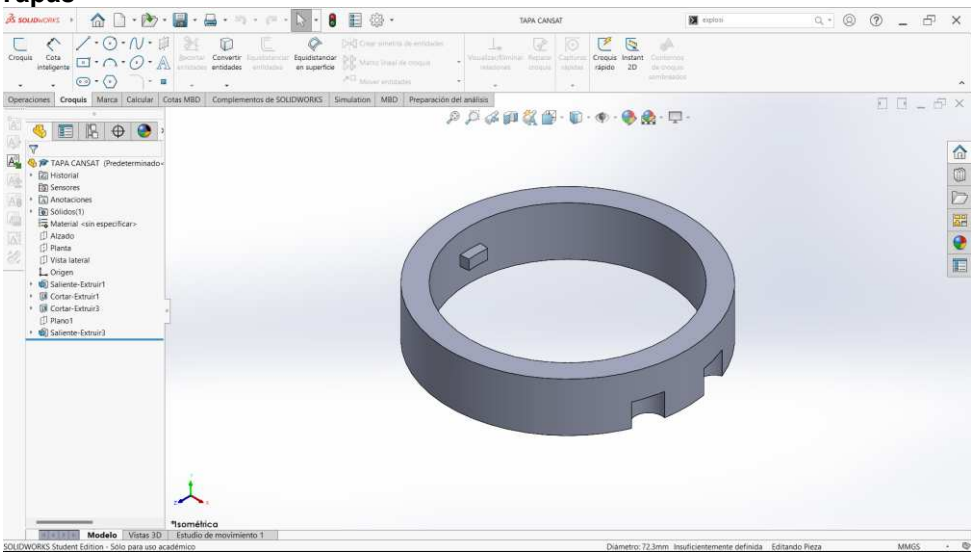


Figura 16. Tapa exterior.

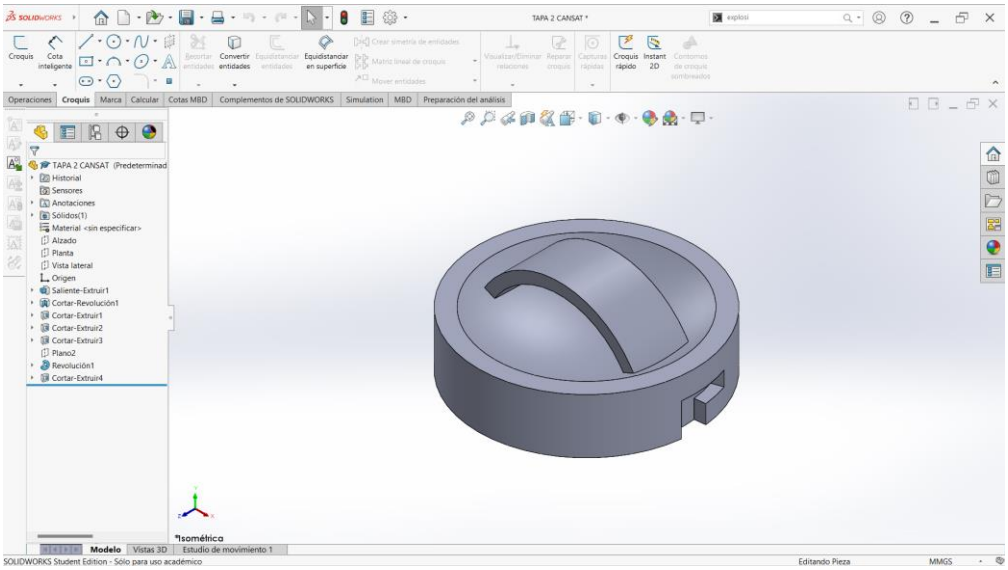


Figura 17. Tapa de acceso interior.

Estas tapas están diseñadas de tal manera que puedan tener 2 funcionalidades; una es permitir el acceso al área superior de sensores, mientras que otra funcionalidad que se aplicó fue el permitir retirar de manera más fácil el interior del satélite cuando este se encuentra dentro de la lata. Esto se logra mediante el giro de la segunda tapa permitiendo atorar una muesca evitando que al jalar la tapa se pueda acceder al área de módulos y sensores.

- ✓ **Implementación de los sensores**

Se realizó una implementación de todos los módulos utilizados dentro del CANSAT; para esto se realizó el siguiente código:

%%SE PRESENTA SOLO UN FRAGMENTO INFORMATIVO DEL CODIGO ORIGINAL%%%
%%SI NECESTA EL CODIGO COMPLETO CONTACTE ALGUNO DE LOS AUTORES %%

```
#include <SPI.h> // Librería para la comunicación SPI (Serial Peripheral Interface)
#include <SD.h> // Librería para manejar la tarjeta SD
#include <FS.h> // Librería para manejar el sistema de archivos
#include <DHT.h> //incluye libreria DHT de Adafruit
#include <DHT_U.h> //incluye libreria Adafruit Unifield Sensor
#include <Adafruit_BMP085.h>
#include <Adafruit_MPU6050.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include<Wire.h>
#include<RTClib.h>
Adafruit_BMP085 bmp;
Adafruit_MPU6050 mpu;
RTC_DS1307 rtc;
#define SD_CS_PIN 5 // Definir el pin CS (Chip Select) de la tarjeta SD
#define Sensor 4 //Definri el pin del sensor
DHT dht(Sensor, DHT11); // objeto dht del tipo DHT en pin 4 y modelo DHT11
// La función setup() se ejecuta una vez al inicio del programa
void setup() {
Serial.begin(115200);// Inicializar la comunicación serie a una velocidad de 115200 baudios
while (!Serial)
delay(10);
Serial.println("Adafruit MPU6050 test!");
if (!mpu.begin()) {
Serial.println("Conexion fallida");
while (1) {
delay(10);
}
}
case MPU6050_RANGE_4_G:
Serial.println("+-4G");
break;
case MPU6050_RANGE_8_G:
Serial.println("+-8G");
break;
case MPU6050_RANGE_16_G:
Serial.println("+-16G");
break;
}
mpu.setGyroRange(MPU6050_RANGE_500_DEG);
Serial.print("Gyro range set to: ");
switch (mpu.getGyroRange()) {
case MPU6050_RANGE_250_DEG:
Serial.println("+- 250 deg/s");
break;
case MPU6050_RANGE_500_DEG:
Serial.println("+- 500 deg/s");
break;
```

```
12
case MPU6050_RANGE_1000_DEG:
Serial.println("+- 1000 deg/s");
break;
case MPU6050_RANGE_2000_DEG:
Serial.println("+- 2000 deg/s");
break;
}
mpu.setFilterBandwidth(MPU6050_BAND_21_HZ);
Serial.print("Filter bandwidth set to: ");
switch (mpu.getFilterBandwidth()) {
case MPU6050_BAND_260_HZ:
Serial.println("260 Hz");
break;
case MPU6050_BAND_184_HZ:
Serial.println("184 Hz");
break;
case MPU6050_BAND_94_HZ:
Serial.println("94 Hz");
break;
case MPU6050_BAND_44_HZ:
Serial.println("44 Hz");
break;
case MPU6050_BAND_21_HZ:
Serial.println("21 Hz");
break;
case MPU6050_BAND_10_HZ:
Serial.println("10 Hz");
break;
case MPU6050_BAND_5_HZ:
Serial.println("5 Hz");
break;
}
Serial.println("");
delay(100);
dht.begin(); // inicializacion de sensor DHT
// Inicializar la tarjeta SD utilizando el pin CS definido anteriormente
if (!SD.begin(SD_CS_PIN)) {
Serial.println("Error al inicializar la tarjeta SD"); // Si la inicialización falla, mostrar un mensaje de error y terminar
return;
}
Serial.println("Tarjeta SD inicializada correctamente"); // Si la inicialización tiene éxito, mostrar un mensaje de confirmación
// Crear o abrir un archivo en la tarjeta SD con el nombre "test.txt" y modo de escritura
File myFile = SD.open("/test.txt", FILE_WRITE);
if (!myFile) {
Serial.println("Error al abrir el archivo"); // Si no se puede abrir el archivo, mostrar un mensaje de error y terminar
return;
}
//Inicialización del módulo BMP
if (!bmp.begin()) {
// Cerrar el archivo para asegurar que los datos se guarden correctamente
myFile.close();
// Mostrar un mensaje indicando que los datos se han escrito en el archivo
```

```
Serial.println("Datos escritos en el archivo");
// Abrir el archivo "test.txt" en modo de lectura
myFile = SD.open("/test.txt", FILE_READ);
if (!myFile) {
Serial.println("Error al abrir el archivo"); // Si no se puede abrir el archivo, mostrar un mensaje de error y terminar
return;
}
// Leer los datos del archivo y enviarlos a través de la comunicación serie
while (myFile.available()) {
Serial.write(myFile.read()); // Leer un byte del archivo y enviarlo a través de la comunicación serie
}
// Cerrar el archivo después de leer todos los datos
myFile.close();
}
// La función loop() se ejecuta repetidamente en un bucle infinito
void loop() {
// No es necesario hacer nada en el loop en este ejemplo
}
```

Integración de las etapas

Una vez realizadas estas últimas pruebas se procedió a hacer las respectivas conexiones ahora montadas en los módulos impresos en 3D, como se muestra a continuación:

Figura 18. Prototipo final.

Se procedió finalmente a hacer una prueba con la fuente de alimentación y sin necesidad de estar conectado a la computadora, por lo que cuidadosamente se procedió a introducir el conjunto de módulos de control dentro de la lata para comenzar a recabar datos, los cuales fueron los siguientes:

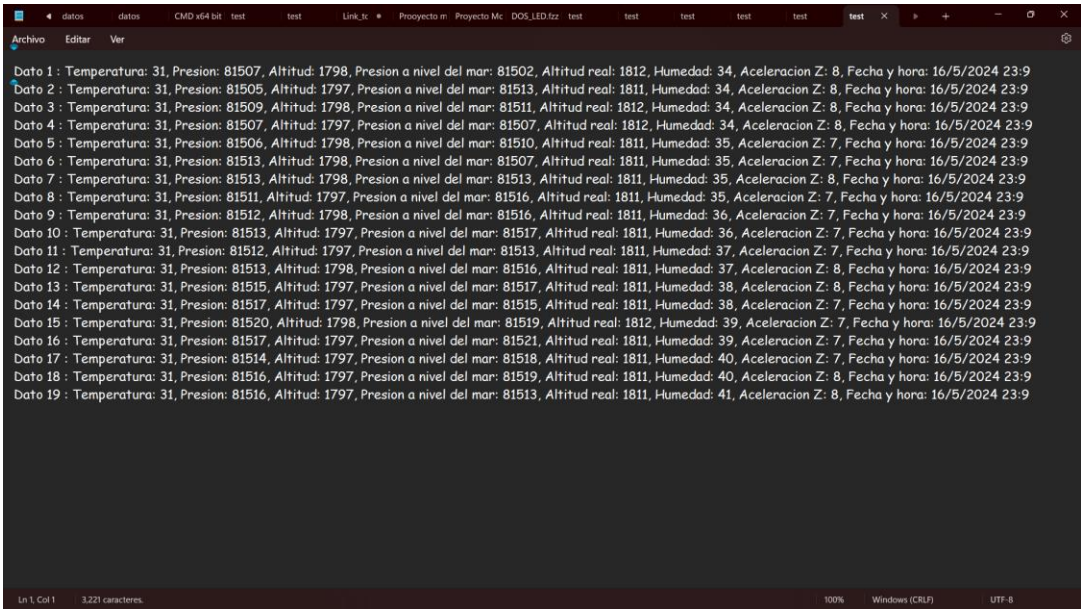


Figura 19. Ejemplo de lecturas tomadas con el microsatélite funcionando.

5. Conclusiones

A lo largo del desarrollo de el proyecto fue posible la aplicación de conocimientos adquiridos de materias como instrumentación y dibujo asistido por computadora; por parte de la instrumentación destaca principalmente el saber usar sensores y recolectar datos para ser analizados posteriormente. Hablando de la importancia del dibujo asistido por computadora para el desarrollo del proyecto, es posible decir que su importancia fue tanta como la de la instrumentación; ambas se complementaron para llegar a un común objetivo.

Para este punto se puede mencionar que el prototipo es funcional, pero puede mejorar gracias propuestas de mejora tanto internas como externas al equipo de desarrollo de este proyecto; los puntos de mejora principalmente se basan en la recolección de datos e integridad del dispositivo; si de la recolección de datos se trata, como punto de mejora se tiene el cambio en la estructura que encapsula al CANSAT, pues los datos que recolectan los sensores son correctos, sin embargo las lecturas se pueden ver afectadas una vez los módulos se encuentren encapsulados sin algún sistema que permita ventilar el interior, el ambiente hermético aunado a la luz solar puede provocar calentamientos que alteren la lectura y registro de datos. Ahora; si de la integridad del dispositivo se trata, otra propuesta de mejora es la creación de un sistema de paracaídas que permita que al momento de que el CANSAT impacte con el suelo, sea con una baja intensidad.

Con todo lo mencionado anteriormente, se puede llegar a la conclusión de que se logró el desarrollo de un microsatélite enlatado funcional aplicando conocimientos de distintas áreas de la mecatrónica, convirtiendo así el proyecto en un proyecto integrador de los conocimientos que los alumnos han adquirido a lo largo de la carrera, siempre abiertos a propuestas de mejora que permitirán que este proyecto logre desarrollarse de manera más óptima y su funcionamiento no se vea afectado por adversidades a las que este prototipo se verá enfrentado de manera práctica.

Agradecemos por el apoyo y las facilidades otorgadas al Tecnológico Nacional de México /Instituto Tecnológico de Querétaro Campus Norte, así como al apoyo del Programa de Nuevos Talentos Científicos y Tecnológicos del Estado de Querétaro Convocatoria 2024.

Referencias

[1] Gómez Estudiño, G., (2019) CanSat, el nanosatélite para monitorear el medio ambiente - CCEEA. cceea.mx. https://cceea.mx/blog/tecnologia/cansat-el-nanosatelite-para-monitorear el-medio ambiente
[2] Tjandra, K., (2020) CanSat 2020 Preliminary Design Review (PDR) Version 2.0
[3] Colin, A. (SF) Picosatélites cansat: una herramienta para la educación en ciencias del espacio
[4] Programa Espacial Universitario | Descripción CANSAT. (SF). http://peu.unam.mx/descripcionCANSAT.html
[5] The European Space Agency (ESA), (SF) What is a CanSat? https://www.esa.int/Education/CanSat/What_is_a_CanSat
[6] Cansat Leadership Training Program (CLTP). (2024). https://cltp.info/
[7] Salazar Quintero, B. E., (SF), Construye tu CanSat AEM-1 20180109_Manual_de_armadoTT.pdf (aem.gob.mx)
[8] MAXIM. (2015). DS1307 64X8, Serial, I * C Real-Time-Clock. In.
[9] AV Electronics. (2024, 13 agosto). DHT11 Temperatura y humedad - AV Electronics. https://avelectronics.cc/producto/dht11-temperatura-y-humedad/
[10] Sensor de presión BMP180. (s. f.). Naylamp Mechatronics - Perú. https://naylampmechatronics.com/sensores-posicion-inerciales-gps/75-sensor-de-presion-bmp180.html
[11] TDK INVENSENSE,» 2003. [En línea]. Available: https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/.
[12] «Software de Arduino,» [En línea]. Available: https://arduino.cl/programacion/
[13] "SciELO" [En línea]. Available: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-55462018000200451

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 37, pp. 536 - 545.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Modulo Didáctico Electroneumático Programable

Soto Hernández Bruce, Alejandre Flores Marisol, Sánchez Nájera Jesús Claudio, Loa Ramírez Luis Alberto, Hermoso Herbert Jimena Mariel y Olmos Solís David.

Instituto Politécnico Nacional CECyT 2 Miguel Bernard, Maquinas con Sistemas Automatizados, Proyectos SIP 20242262 y SIP 20242197, Av. Nueva Casa de la Moneda 133, Colonia Lomas de Sotelo, CP 11200,Alcaldía Miguel Hidalgo, Ciudad de México .
brucee.soto@gmail.com

Resumen

En este proyecto se hace énfasis en la automatización de máquinas por medio de dispositivos electroneumáticos y PLC's, mediante los cuales se puede operar un sistema programado o procesos con la mínima intervención del ser humano. En la actualidad la mayoría de las empresas industriales poseen una alta tecnología de automatización utilizada en su totalidad o en parte de sus procesos de fabricación. En el presente trabajo se plantea el diseño, ensamblaje y construcción de un módulo didáctico Electroneumático que estará integrado por distintos cilindros neumáticos y válvulas electroneumáticas, una fuente de alimentación de 24VCD (para los componentes eléctricos), así también con su respectivo compresor y unidad de mantenimiento. Este módulo ayudará a que los alumnos tengan un mejor desempeño en el desarrollo de las prácticas y les permita un desenvolvimiento en un ambiente laboral perteneciente a su área. Como resultado se obtuvo un Módulo didáctico automatizado que está integrado por cilindros neumáticos, válvulas electroneumáticas, dispositivos de entrada y salida, y Controladores Lógicos Programables (PLC's) desarrollando competencias profesionales en los alumnos como la Instalación de sistemas automatizados y resolución de problemas de caso.

Palabras clave: PLC, Automatización, Electroneumático, Didáctico.

1. Introducción

Existen varios módulos didácticos electroneumáticos programables en el mercado, cada uno diseñado para facilitar el aprendizaje de principios de neumática y automatización. A continuación, se presentan algunos de los módulos más conocidos y utilizados en entornos educativos y formativos:

1. *Festo Didactic*
   - *Módulos de Neumática y Electrónica*: Festo ofrece una amplia gama de módulos didácticos que permiten a los estudiantes aprender sobre sistemas neumáticos, hidráulicos y de automatización. Sus kits incluyen componentes como válvulas, cilindros y controladores programables.

2. *Sick AG*
   - *Módulos de Sensores*: Sick proporciona módulos que integran sensores en entornos electroneumáticos, permitiendo a los estudiantes trabajar con la detección y el control de procesos.

3. *Pneumatic Training Systems (PTS)*
   - *Kits de Formación Neumática*: Estos kits incluyen componentes básicos y avanzados para enseñar los fundamentos de la neumática, así como sistemas de control programables.

4. *Schaeffler*

- *Módulos de Formación en Automatización*: Schaeffler proporciona sistemas didácticos que combinan neumática y sistemas de control, permitiendo a los estudiantes aprender sobre automatización.

5. *Módulos de Formación de Siemens*
   - *Siemens LOGO! y S7*: Estos controladores programables pueden ser utilizados en combinación con módulos neumáticos para enseñar automatización industrial.

En la actualidad, la automatización de procesos es un factor clave en la evolución de la industria, permitiendo aumentar la eficiencia y reducir la intervención humana en tareas repetitivas o peligrosas. Este proyecto se centra en la implementación de sistemas automatizados utilizando dispositivos electroneumáticos y controladores lógicos programables (PLC's), los cuales permiten operar diversos procesos con mínima intervención manual. [1] Muchas empresas industriales han adoptado tecnologías avanzadas de automatización para optimizar sus operaciones de fabricación, ya sea parcial o totalmente. [2]

El objetivo principal de este proyecto es el diseño, ensamblaje y construcción de un módulo didáctico electroneumático programable, pensado para mejorar la formación práctica de los estudiantes en el ámbito de la automatización industrial. El módulo estará compuesto por diversos elementos como cilindros neumáticos, válvulas electroneumáticas, una fuente de alimentación de 24VCD para los componentes eléctricos, un compresor y una unidad de mantenimiento. Estos componentes forman un sistema completo que permite a los alumnos simular y ejecutar procesos automatizados similares a los que encontrarán en un entorno industrial real.

El desarrollo de este módulo didáctico proporciona a los estudiantes la oportunidad de adquirir competencias profesionales fundamentales, como la instalación de sistemas automatizados, la resolución de problemas técnicos y el manejo de dispositivos industriales avanzados. Además, fomenta su capacidad para desenvolverse en un ambiente laboral alineado con su área de especialización. Como resultado final, se ha creado un módulo que integra cilindros neumáticos, válvulas electroneumáticas, dispositivos de entrada y salida, y PLC’s, proporcionando una plataforma efectiva para el aprendizaje práctico de la automatización industrial.

.

2. Modulo Didáctico

Son un conjunto de materiales y recursos asociados a un contenido, creados con el objetivo de favorecer y enriquecer el proceso de enseñanza y aprendizaje en las asignaturas.
Los módulos didácticos, tableros o entrenadores de las marcas FESTO Y SIEMENS manejan terminales tipo banana (Figura 1) lo cual es una ventaja para el aprendizaje respecto a la programación en este tipo de controladores, ya que facilitan las conexiones.

Figura 1 cable banana, tomada de https://www.mcielectronics.cl/

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 37, pp. 536 - 545.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

2.1 Controlador Lógico Programable

El Controlador Lógico Programable es una pequeña computadora que se utiliza para automatizar procesos electromecánicos, electroneumáticos y electrohidráulicos. El cual realizará su función a base de entradas y salidas analógicas y digitales. Las entradas analógicas pueden convertir una magnitud analógica (como puede ser la temperatura o la presión) que es mandada de un sensor o de un simple botón, ya que estos pueden leer tensiones e intensidades y al mismo modo las salidas analógicas permiten mandar una señal en forma de intensidad o tensión, pero en cambio las entradas y salidas digitales solo van a recibir o mandar una señal de tensión donde interpretará como 24 volts como 1 y 0 volts.

Figura 2 PLC S7-1200, tomada de http://www.inaselecuador.com/

2.2 Electroválvulas

Las electroválvulas son dispositivos electromecánicos que controlan el flujo de un líquido o gas en un sistema mediante una señal eléctrica. Estas válvulas se utilizan ampliamente en aplicaciones donde es necesario controlar automáticamente el paso de un fluido, como en sistemas de riego, automatización industrial, sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), e incluso en la industria automotriz.

2.2.1 Componentes principales de una electroválvula:

1. **Cuerpo de la válvula**: Contiene los puertos de entrada y salida del fluido.
2. **Solenoide**: Un electroimán que, al recibir una corriente eléctrica, genera un campo magnético.
3. **Émbolo o núcleo móvil**: Es desplazado por el campo magnético generado por el solenoide, abriendo o cerrando el paso del fluido.
4. **Resorte**: Devuelve el émbolo a su posición original cuando se interrumpe la corriente.

2.2.2 Tipos de electroválvulas:

1. **Electroválvulas de acción directa**: El solenoide controla directamente la apertura o cierre de la válvula.
2. **Electroválvulas piloto**: Utilizan la presión del propio fluido para ayudar en la apertura o cierre de la válvula.
3. **Electroválvulas de dos vías**: Permiten o impiden el paso del fluido.
4. **Electroválvulas de tres vías**: Dirigen el flujo del fluido entre dos salidas diferentes.

Figura 3 Electroválvula, tomada de https://cablenortesrl.com/producto/electrovalvula-5-2-serie-a1e250-1-4-api/

2.3 Cilindros Neumáticos

Los cilindros neumáticos son dispositivos mecánicos que convierten la energía del aire comprimido en movimiento lineal. Son ampliamente utilizados en sistemas de automatización y control industrial debido a su capacidad para generar fuerzas significativas con un diseño relativamente simple.

2.3.1 Componentes principales:

1. **Cilindro**: El cuerpo principal que contiene el pistón.
2. **Pistón**: La parte móvil dentro del cilindro que se desplaza debido a la presión del aire.
3. **Varilla**: Conectada al pistón, transmite el movimiento a una carga externa.
4. **Tapas**: Sellan los extremos del cilindro.
5. **Juntas y sellos**: Garantizan que no haya fugas de aire.
6. **Válvulas**: Controlan la entrada y salida de aire comprimido.

2.3.2 Tipos de cilindros neumáticos:

1. **Cilindro de simple efecto**: El aire comprimido mueve el pistón en una dirección, y un resorte lo devuelve a su posición original.
2. **Cilindro de doble efecto**: El aire comprimido mueve el pistón en ambas direcciones, permitiendo tanto el avance como el retroceso sin necesidad de un resorte.
3. **Cilindro sin varilla**: Utiliza un pistón magnético o bandas mecánicas para transmitir el movimiento, eliminando la necesidad de una varilla exterior.
4. **Cilindro telescópico**: Tiene varias etapas que se extienden de forma similar a un telescopio, lo que permite una mayor longitud de carrera en un espacio compacto.

Figura 4 Cilindro Neumático, tomada de https://www.hydraulic-calculation.com/es/article.php?ID=39

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 37, pp. 536 - 545.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

2.4 Sensores

Los sensores son dispositivos que detectan cambios físicos o químicos en el entorno y convierten esas variaciones en señales eléctricas, las cuales son procesadas para controlar sistemas automáticos. En el contexto de la automatización de máquinas mediante dispositivos electroneumáticos y PLC's, los sensores desempeñan un papel clave para la interacción con el entorno y la toma de decisiones en tiempo real.

2.4.1 Tipos de Sensores Comunes en Sistemas Electrónicos y Neumáticos:

1. **Sensores de Proximidad**:
   - **Inductivos**: Detectan objetos metálicos sin contacto físico mediante campos electromagnéticos.
   - **Capacitivos**: Detectan objetos de cualquier material (metálico o no) mediante cambios en el campo eléctrico.
   - **Ópticos**: Emplean luz infrarroja o visible para detectar la presencia o ausencia de objetos.

2. **Sensores de Presión**:
   - Utilizados para medir la presión de aire en sistemas neumáticos.
   - Pueden dar información sobre fallas en la presión de alimentación o alcanzar el nivel deseado en un actuador.

3. **Sensores de Temperatura**:
   - Miden la temperatura de un proceso o equipo.
   - Importantes para mantener control en sistemas que requieren regulación térmica.

4. **Sensores de Posición**:
   - Usados para monitorear la ubicación de actuadores, como pistones neumáticos, detectando si han alcanzado su posición final.
   - Pueden ser interruptores de límite (finales de carrera) o sensores magnéticos.

5. **Sensores de Flujo**:
   - Detectan el caudal de aire o líquido en un sistema, fundamentales en procesos que dependen de un suministro continuo y regulado.

6. **Sensores de Nivel**:
   - Utilizados para medir la cantidad de líquido o material granular en depósitos.

2.4.2 Conexión de Sensores con PLC:

Los sensores se conectan a los PLC's (Controladores Lógicos Programables) a través de entradas digitales o analógicas, dependiendo del tipo de sensor. Los sensores digitales generan una señal de "todo o nada" (on/off), mientras que los sensores analógicos generan una señal continua que puede variar dentro de un rango específico

Figura 5 Sensor, tomada de https://www.cursosdeplc.com/que-es-un-sensor.html

2.5 Indicadores Luminosos

Los indicadores luminosos son dispositivos visuales utilizados para señalar estados o condiciones específicas de un sistema automatizado. En el contexto de la automatización de máquinas con dispositivos electroneumáticos y PLC's, los indicadores luminosos permiten a los operadores monitorear el funcionamiento del sistema en tiempo real, proporcionando información crítica sobre el estado de los procesos.

2.5.1 Tipos de Indicadores Luminosos:

1. **Luces Piloto (Pilotos de Señalización)**:
   - Son luces de colores (verde, rojo, amarillo, azul, blanco) que indican diferentes estados operativos.
   - **Verde**: Estado operativo o en funcionamiento normal.
   - **Rojo**: Error o parada de emergencia.
   - **Amarillo**: Advertencia o condición intermedia, como carga o descarga en progreso.
   - **Azul o Blanco**: Estados especiales, como modos manuales o mantenimiento.

2. **Torretas de Señalización (Torreta de Luces)**:
   - Son torres de varios niveles que combinan luces de diferentes colores para mostrar múltiples estados de operación en una máquina.
   - Se utilizan en entornos industriales para monitorear de manera visible el estado de varias máquinas desde la distancia.
   - Ejemplo: Si una máquina está trabajando correctamente, la luz verde estará encendida, mientras que si se presenta una falla, se activará la luz roja.

3. **Indicadores LED**:
   - Los LED's (diodos emisores de luz) son muy comunes por su bajo consumo de energía y su larga vida útil.
   - Se pueden utilizar en paneles de control para mostrar el estado de distintos procesos de manera clara.

4. **Pantallas o Displays Luminosos**:
   - Son pantallas que muestran información detallada como valores numéricos (temperatura, presión, etc.), aunque en algunos casos también pueden mostrar alertas visuales.

2.5.2 Aplicaciones de Indicadores Luminosos en Automatización:

- **Estado de los Sensores**: Los indicadores pueden iluminarse para señalar si un sensor ha detectado un objeto o si el nivel de presión es correcto.
- **Monitoreo de Secuencias**: Los indicadores se usan para mostrar el progreso de una secuencia en un proceso automático, como el avance de un pistón neumático.
- **Alarmas Visuales**: Señalan fallos en el sistema, como pérdida de presión, sobrecalentamiento, o errores en la señal de un sensor.

2.5.3 Conexión con PLC:

Los indicadores luminosos suelen estar conectados a las salidas digitales del PLC. Dependiendo del estado de las entradas (sensores) y la lógica programada en el PLC, se activarán o desactivarán ciertos indicadores para informar a los operadores sobre el estado del sistema.

Figura 6 Indicador Luminoso, tomada de https://www.directindustry.es/prod/utility-electrical-co-ltd/product-163278-1736137.html

Resultados

Como resultado del presente proyecto, se logró el diseño y construcción de un módulo didáctico electroneumático completamente automatizado. Este módulo se compone de una integración efectiva entre cilindros neumáticos, válvulas electroneumáticas, dispositivos de entrada y salida, y Controladores Lógicos Programables (PLC's).

El funcionamiento del módulo permite simular y ejecutar procesos industriales con mínima intervención humana, lo que proporciona a los estudiantes una experiencia más cercana a un entorno real de trabajo. Durante la fase de pruebas, se verificó que todos los componentes operan de manera sincrónica, y se constató que la fuente de alimentación de 24VCD junto con el compresor y la unidad de mantenimiento aseguran la estabilidad y eficiencia del sistema.

Este módulo no solo facilita el aprendizaje práctico de los estudiantes, sino que también fomenta el desarrollo de competencias clave, como la instalación y mantenimiento de sistemas automatizados, además de habilidades de diagnóstico y resolución de problemas. Los alumnos pudieron interactuar con sistemas industriales complejos y adquirir experiencia en programación de PLC's, lo que representa un avance significativo en su preparación para el entorno laboral de la automatización industrial.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 37, pp. 536 - 545.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

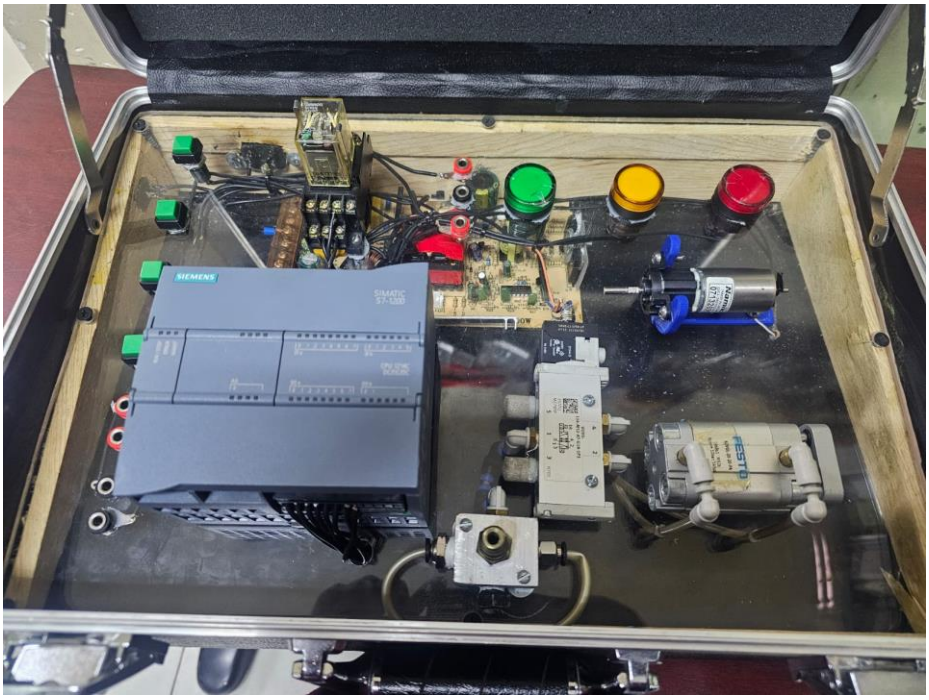


Figura 7 Modulo didáctico

Figura 8 Modulo didáctico

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 37, pp. 536 - 545.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

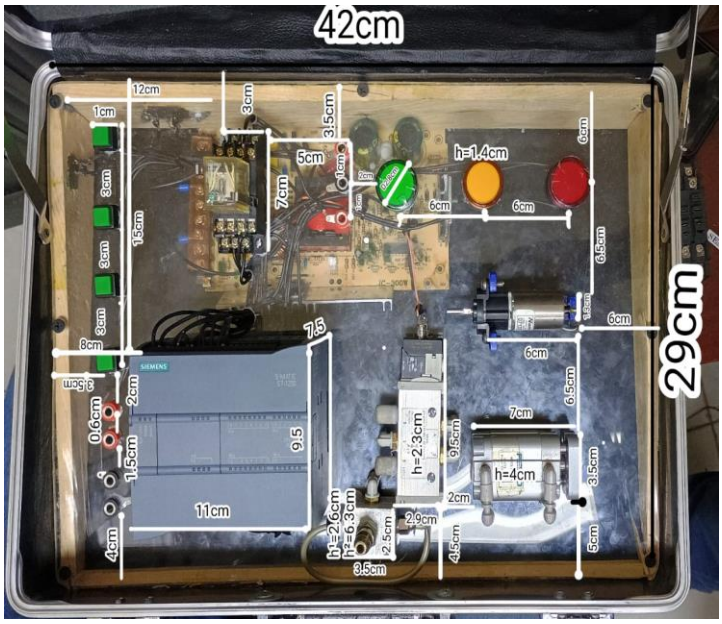


Figura 9 Modulo didáctico con medidas

3. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto permitió alcanzar los objetivos planteados, logrando la creación de un módulo didáctico electroneumático automatizado que simula procesos industriales reales. Este módulo no solo representa una herramienta valiosa para la enseñanza de los sistemas automatizados, sino que también ha demostrado ser eficaz en la mejora del aprendizaje práctico de los estudiantes, brindándoles un entorno más cercano al que encontrarán en el ámbito laboral.

La integración de cilindros neumáticos, válvulas electroneumáticas y PLC's ha permitido a los alumnos desarrollar competencias fundamentales, como la instalación, programación y mantenimiento de sistemas automatizados. Además, la experiencia práctica adquirida a través de este módulo ha facilitado la resolución de problemas y la toma de decisiones en tiempo real, lo que fortalece sus habilidades técnicas y su confianza al trabajar con tecnologías de automatización.

En conclusión, la implementación de este tipo de herramientas didácticas no solo enriquece el aprendizaje teórico, sino que también asegura que los estudiantes estén mejor preparados para enfrentar los desafíos del sector industrial moderno, donde la automatización juega un papel crucial en la mejora de la eficiencia y productividad.

El impacto en la educación que tiene el proyecto es con los alumnos y docentes de las carreras de máquinas con sistemas automatizados y aeronáutica, porque ayuda a fortalecer los conocimientos que se proponen en cada competencia particular, con esto se lograría que con las habilidades de los alumnos puedan realizar sus prácticas en tiempo y forma y creando así escenarios similares a un ambiente laboral perteneciente a su área.

Al finalizar la construcción del Módulo Didáctico Electroneumático Programable, se confirma que dicho modulo es viable y de gran utilidad, ya que se comprobó la funcionalidad al ponerlos en operación con alumnos en realización de las prácticas de la carrera de Máquinas con Sistemas Automatizado, logrando alcanzar y desarrollar las competencias que marca los programas de estudio. Además, el costo de la elaboración de los módulos de control desarrollados es muy inferior a los que pudieran adquirirse con fabricantes particulares de material didáctico, lo que nos permitirá equipar con mayor número de módulos el taller electromecánico del Cecyt 2 “Miguel Bernard” del Instituto

Politécnico Nacional, dada la factibilidad del módulo es importante mencionar que estamos en la búsqueda y aprobación de más recurso para la elaboración de más Módulos Didácticos.

Referencias

[1] Issur, B. H. B., Eduardo, M. G. J., Delia, S. M., Heber, H. C., & Ruíz, H. B. (2024). Diseño de un tablero electroneumático didáctico programable modular.

[2] Albuja, W. A. P. MÓDULO DIDÁCTICO DE ELECTRONEUMÁTICA PARA.

[3] Camargo, E., Vega, C., & Torres, D. (2018). Diseño de un módulo de posicionamiento electroneumático para el entrenamiento de profesionales afines de la automatización y control industrial. *Entre Ciencia e Ingeniería*, *12*(23), 23-30.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 38, pp. 546 - 552.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Exploración de Patrones Nodales de Arena en Placa Circular Mediante Solenoide

Castro López Angel Gustavo[1], Negrete Elizarraraz José Luis[1], Villaseñor Aguilar Marcos Jesús[1], Rostro González Horacio[2] y Cano Lara Miroslava [1*]

[1]TecNM-Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, Depto. de Mecatrónica, Irapuato, Gto. C.P. 36821.
[2]Universidad de Guanajuato-DICIS, Depto. de Electrónica, Salamanca, Gto., C.P. 36000.

Resumen

El estudio de las ondas de movimiento en placas de metal analiza la forma de propagación de la onda en zonas denominadas nodos y antinodos, puntos donde la vibración es mayor e igual a cero. Existe una relación entre la formación de los nodos con la geometría de la placa de aplicación del movimiento al rebotar del borde exterior de la placa al punto de origen de la vibración. El uso de dispositivos de inducción electromagnética permite generar ondas de vibración a frecuencias caracterizadas mediante las cuales se tiene un ambiente de mayor control en los patrones de movimiento vibratorios en conjunto con técnicas de visualización. En el presente trabajo se diseñó un sistema de generación de ondas vibratorias en una placa circular de aluminio de 20 cm de diámetro, mediante el accionamiento de un solenoide controlado bajo inducción magnética por un encoder en la extracción de los patrones de movimiento a las frecuencias de 159, 190, 290 y 310 Hz, se formó una base de datos con videos de duración de 10 segundos por frecuencia a las cuales, se extrajo el frame con la mejor representación del patrón nodal visto en las partículas de arena, se analizaron los fotogramas extraídos en el entorno de Matlab implementando el método FFT (Transformada Rápida de Fourier) se calculó su transformada FFT y la simulación del patrón 3D. Se observó un aumento en la amplitud de onda en las frecuencias de 159 Hz y 310 Hz producto de coincidir con el modo de vibración de la placa metálica y teniendo como límite los 400 Hz de oscilación. Como trabajo a futuro se implementará un solenoide con menor tiempo de respuesta que permita superar los 400 Hz para aumentar el rango y analizar frecuencias superiores.

Palabras clave: Figuras de Chladni, solenoide, análisis modal.

1. Introducción

El análisis de vibración mecánica en placas metálicas al ser sometidas a una fuerza externa oscilatoria permite comprender el movimiento de propagación bidimensional energético producido en forma de ondas mecánicas dependiente de las características físicas del metal. La forma geométrica de la placa altera la propagación de las ondas mecánicas vibratorias provocando sobreposición de ondas al ser redireccionadas del borde exterior de la placa denominado movimiento armónico simple [1]. La placa metálica tiene diferentes modos de vibración dependientes del número de los modos armónicos (m_a), que al coincidir la frecuencia de vibración con los distintos modos se aumenta la amplitud (a) como se observa en la figura 1,

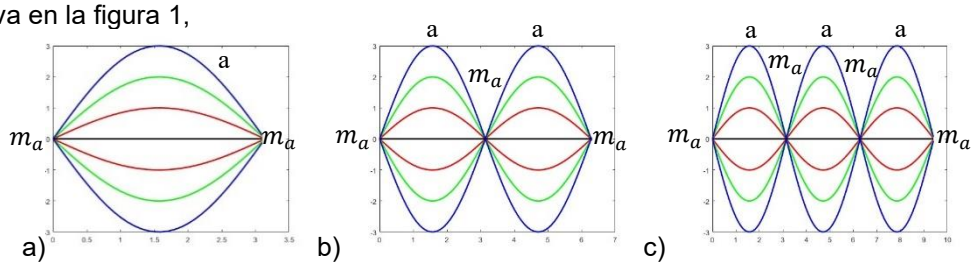


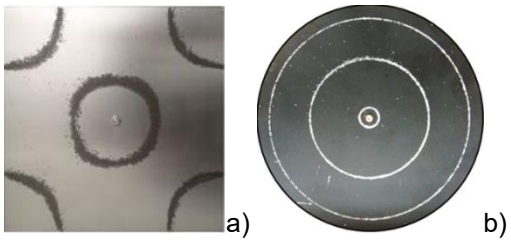
Figura 1. Modos normales de vibración: a) fundamental o primer armónico; b) segundo armónico y c) el tercer armónico [1].

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 38, pp. 546 - 552.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Para el cálculo del modo normal de vibración es necesario conocer la frecuencia natural (f) de la placa de metal formulado en la ecuación 1, donde (k) se define como el módulo de rigidez cortante y (m) a la masa del objeto. Por lo tanto, los modos normales son dependientes de dicha frecuencia.

$$f = \frac{1}{2}\pi * \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{1}$$

La interpretación de los modos normales de vibración bidimensionales en la superficie de la placa persiste de una superposición de ondas oscilantes con puntos críticos denominados nodos donde la vibración es mayor en puntos específicos del área de superficie en la placa. La figura 2 muestra el resultado de un actuador electromecánico que genera una vibración puntual en el centro de placa cuadrada (figura 2a) y circular (figura 2b) obteniéndose los nodos puntuales donde la vibración se dispersa en dirección a los antinodos generando zonas dependientes de la geometría de la placa dada al revote de la onda desde los bordes hacia el origen, formando patrones con un movimiento oscilatorio de amplitud igual a cero usando la visualización por computadora mediante filtro de suavizado en la imagen para filtrar el ruido generado por la iluminación y la placa de análisis.



a) b)

Figura 2. Figuras de Chladni generadas por generador electromecánico de vibraciones en superficie: a) Rectangular a 340 Hz [2] y b) Circular a 300 Hz [3].

La propagación de la energía entre una placa circular es posible de visualizar mediante el uso de partículas volátiles como la arena visualizar los nodos de la frecuencia vibratoria identificando una relación entre la frecuencia de entrada y el patrón formado con la arena como medio de visualización, a dichos patrones son conocidos como figuras de Chladni descritos en la ecuación 2 [2] con un radio (R) y cuyo punto de origen vibratorio es en el centro, a su vez dicha ecuación esta expresada matemáticamente en coordenadas polares (r, θ) siendo A la amplitud del punto de excitación de la onda y K el número de onda identificable en la ecuación 3. En la Figura 3, dado al número de frecuencias armónicas (f_{mn}) posibles con las que son generados los patrones en una placa circular en un rango delimitado de 0 Hz a 1200 Hz basado en el número de subdivisiones que estas presenten (M) entre el número de circunferencias formadas (n) así como la distancia de separación entre circunferencias (λmn).

$$\psi(r,\theta) = \frac{A}{r}e^{ikr} + \frac{A}{r}e^{-ik(r+\varphi)} + A\int_0^{2\pi} \frac{e^{ik|\vec{r}-R\hat{\theta}|}}{|\vec{r}-R\hat{\theta}|}\cos(kR\theta)\, d\theta \tag{2}$$

$$K = 2\pi r - n * \lambda \tag{3}$$

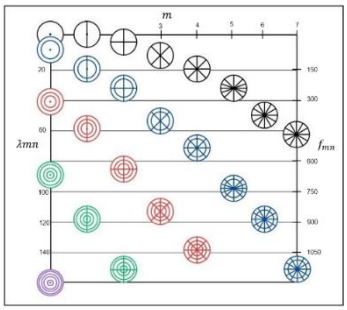


Figura 3. Clasificación de patrones de vibración en placas circulares basado en los valores de m, n y λmn [7].

En este tipo de estudios es común trabajar en frecuencias de mayor rango para analizar los patrones complejos de Chladni [4] como lo es en motores generadores de vibración con capacidad de operación a mayores frecuencias de1000 a 5000 Hz [4][5][6].

La aplicación de actuadores permite de manera eficaz generar vibraciones en el sistema oscilatorio, la principal diferencia entre actuadores mecánicos y electromecánicos deriva del medio de activación siendo la primera de origen manual con alimentación de energía mecánica con salida mecánica con una amplificación en la frecuencia y amplitud, mientras que los actuadores electromecánicos operan con la inducción de energía eléctrica para generar una salida mecánica con una amplificación de energía proporcional pero con la misma frecuencia del pulso eléctrico [10]. Cómo se puede observar en la figura 5, un solenoide es un actuador conformado por un embobinado cuyo campo magnético permite el accionamiento de un embolo magnético incentivando su movimiento lineal a través de una guía metálica induciendo un movimiento mecánico rectilíneo [11].

En [12] se implementó un solenoide conectado a un resorte formando un sistema de control de vibraciones mecánicas en placas metálicas bajo un control retroalimentado, mientras que en [15] empleando partículas de arena en una placa metálica rectangular de 40 cm por lado con un oscilador electromecánico se extrajeron los patrones de vibración en las frecuencias de 0 a 400 Hz. Por otro lado [2] empleando el entorno de ANSYS se simuló los patrones de Chladni en una placa metálica rectangular de 16 cm con frecuencias de 0 a 5000 Hz empleando un kit de vibración basado en un solenoide adaptado con resorte integrado. Obteniéndose en común la aplicación del solenoide combinado con un resorte como medio oscilante conectado en el centro a una placa de geometría Circular o Rectangular.

De esta manera se brinda un mayor control en la aplicación de frecuencias de vibración hacia el centro de la placa por su sencilla implementación y control lo vuelve el dispositivo con capacidad de formar frecuencias de oscilación con un menor tiempo de respuesta en comparación con los dispositivos de generación de vibración mediante ondas sonoras. Existen métodos de visualización digitales que permiten vincular la descripción del modelo físico de frecuencia descritas en las ecuaciones 2 y 3 implementando el análisis de imágenes. La Transformada Rápida de Fourier (FFT) [8] permite desglosar la función regida en el dominio del tiempo para operar bajo el dominio de la frecuencia permitiendo identificar las frecuencias presentes dentro de la función principal para conocer la información contenida de manera discreta; en cambio la Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT) [9] convierte el análisis emitido por FFT de vuelta al dominio del tiempo, permitiendo identificar de manera clara la evolución de la ecuación a través de las frecuencias de onda. Existen operadores de borde de máscara cuyo enfoque es la visualización 2D de la onda de propagación, en contra parte, existen programas de Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE) siendo los más populares SolidWorks y ANSYS [15] cuyo enfoque se basa en el análisis por elemento finito recurriendo en una visualización 3D de la propagación de los nodos y antinodos en la placa de estudio.

En este trabajo se diseñó el estudio del comportamiento de los patrones de vibración en una placa metálica circular de 20 cm de diámetro empleando el software de Matlab para su análisis matemático y visualización en 3D mediante la aplicación del método FFT, IFFT y el filtro de borde Gaussiano para la obtención de la señal oscilatoria en la gráfica de bordes implementando un solenoide en conjunto con un resorte con un rango de frecuencia de oscilación de 0 a 400 Hz usando la tarjeta Esp32.

2. Metodología

Basado en el lenguaje de MicroPython ilustrado en la figura 4 se desarrolló e implementó el sistema de identificación de patrones nodales formados por partículas de arena en una placa circular de aluminio en las frecuencias de 159, 190, 290 y 300 Hz, usando como tarjeta de control el microcontrolador Esp32, un encoder y el accionamiento de un solenoide conectado a un sistema mecánico de resorte.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 38, pp. 546 - 552.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

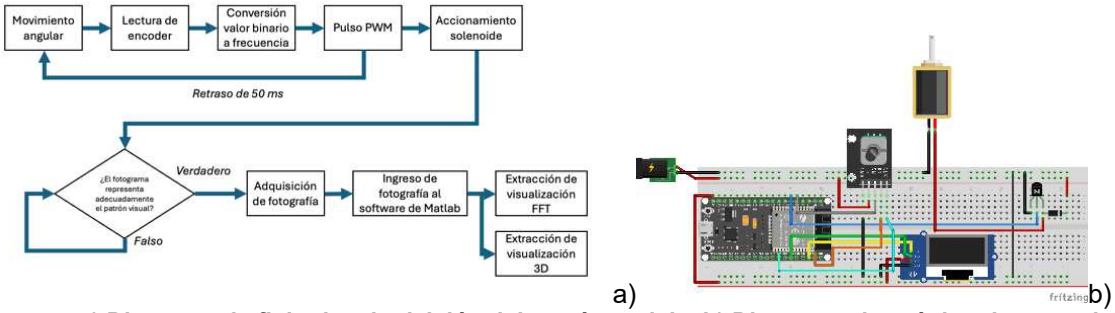


Figura 4. a) Diagrama de flujo de adquisición del patrón nodal y b) Diagrama electrónico de control del solenoide.

2.1 Construcción del prototipo

Para el diseño del prototipo de la figura 5a, tomando en cuenta la placa circular con las propiedades descritas en la tabla 1 como medio oscilatorio y el solenoide descrito en la figura 5c como fuente de movimiento oscilante, se requiere una base con la capacidad de amortiguar las vibraciones generadas por el solenoide y a su vez, posibles perturbaciones externas ajenas al experimento observando la figura 5b empleando como medio de amortiguación silicón caliente solidificado en la cubierta de soporte. Para ajustar el accionamiento se implementó en la figura 5a un encoder mediante el cual se ajusta la variable correspondiente a la frecuencia de activación de un transistor tipo NPN con configuración de amplificación y estabilización del Amperaje, el cual induce el campo magnético necesario para desplazar el embolo; dada a la naturaleza puramente mecánica del accionamiento del solenoide, existe un tiempo mínimo de desplazamiento en el embolo de 0.0025 s entre la bobina de retención y su desplazamiento máximo, por lo tanto, se delimito la frecuencia de energización de su rango de trabajo de 0 a 400 Hz evitando el sobrecalentamiento en la bobina del solenoide.

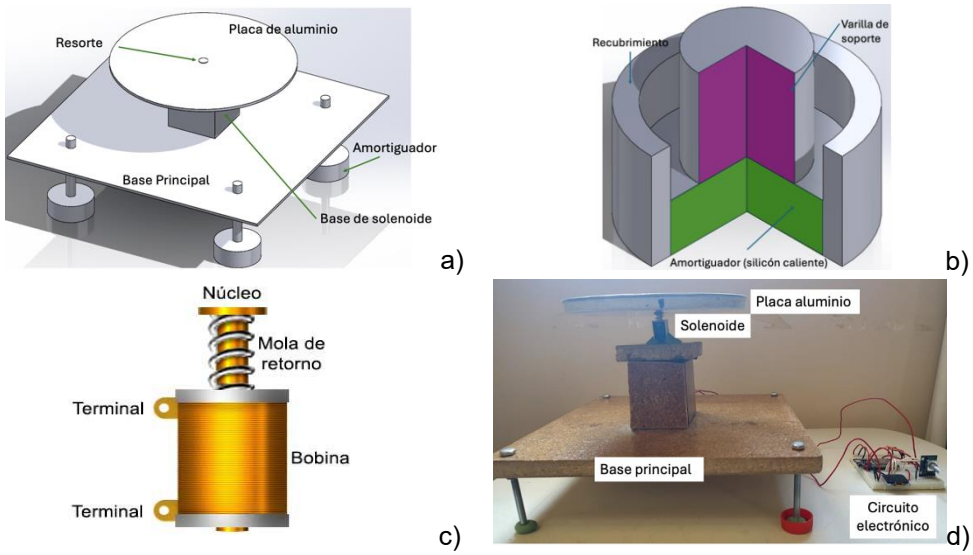


Figura 5. Diagrama del sistema generador de patrones nodales: a) modelo 3D, b) diseño del amortiguador, c) solenoide empleado como actuador, d) sistema.

Característica	Unidad	valor
Material	Aluminio	
Dimensiones	cm	24
Espesor	cm	0.24
Masa	gr	293.1396
Frecuencia natural	Hz	155.58

Tabla 1: Propiedades mecánicas de la placa de aluminio circular.

2.2 Adquisición de muestras

Se tomaron capturas de video con vista superior en una placa circular de aluminio con las propiedades descritas en la tabla 1 en periodos cortos de 20 segundos empleando un encoder rotativo que permita ajustar la frecuencia de accionamiento del solenoide en tiempo real ilustrado en el diagrama electrónico de la figura 4. En la figura 6 se ilustra el proceso de lectura del encoder, el cual controla el valor de la frecuencia a la que es accionada por solenoide en tiempo real ajusta la frecuencia de vibración que incide en la placa circular para su posterior procesamiento usando visión computacional visualizando el patrón obtenido en el estudio de las 4 frecuencias clave basadas en los valores de m y n clasificados en la figura 3: 159 Hz (m = 2, n= 2), 190 Hz (m = 0, n = 2), 290 Hz (m = 3, n = 2) y 310 Hz (m = 4, n = 2) respetando el rango de trabajo del solenoide definido de 0 a 400 Hz, se formó una base de datos con 20 frames correspondientes a cada frecuencia mediante el cual se identificó el fotograma con mayor claridad para su posterior análisis. Es importante resaltar como la frecuencia de 159 Hz y 300 Hz son aproximadamente submúltiplos de la frecuencia natural, por lo que, se observó un aumento en la acumulación de arena representando un amento en la amplitud de la onda de vibración, producto del aumento en el modo de vibración.

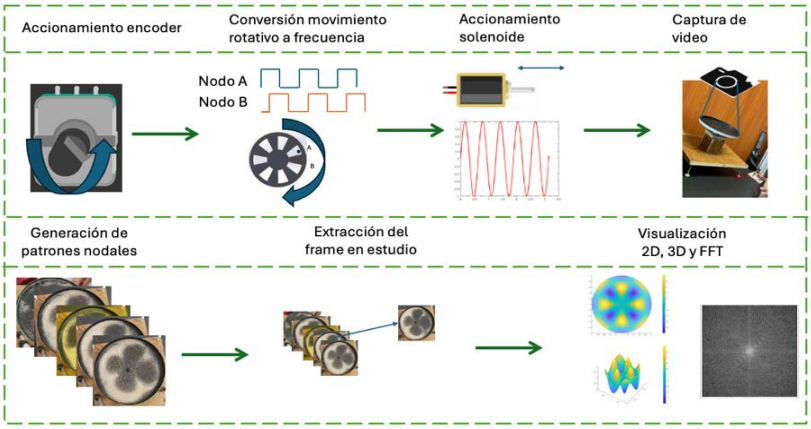


Figura 6. Diagrama de generación y visualización 3D de patrón de vibración nodal.

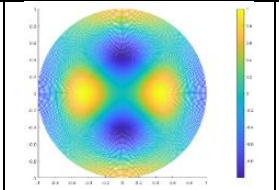
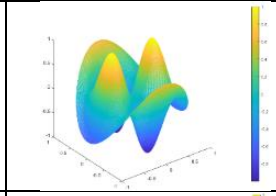
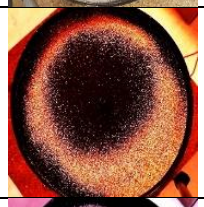
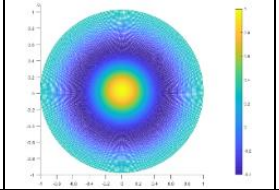
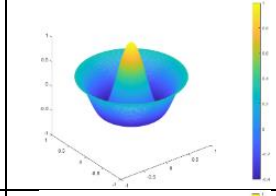
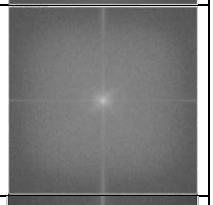
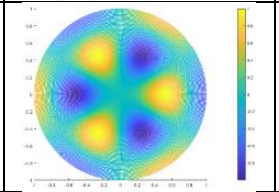
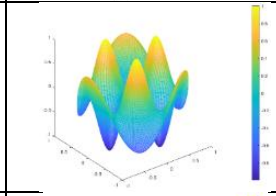
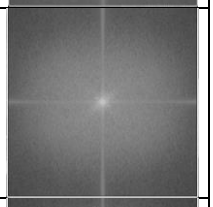
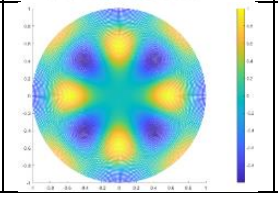
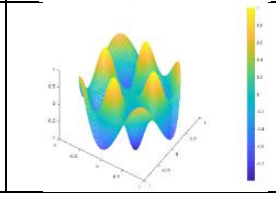
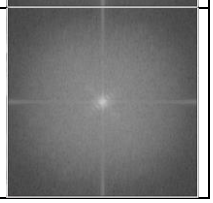
3. Resultados

En la tabla 2 tomando el fotograma característico correspondiente a las frecuencias de 159, 190, 290 y 310 Hz empleando el software de Matlab [8] se simuló la visualización de los patrones en 2D y 3D basado en los valores de M y n asociados a cada frecuencia basado en la figura 3; empleando el programa Image J, tomando como entrada el fotograma de cada frecuencia se extrajo la visualización de FFT y la gráfica de la forma de la onda mecánica basado en la intensidad de pixeles usando como perfil la vista lateral de la imagen. Dado a las características de fabricación del solenoide empleado en la adquisición de muestras, tras superar el umbral de 400 Hz el dispositivo no funciona correctamente dado a que la frecuencia de oscilación supera al tiempo de accionamiento y contracción del cabezal produciendo una vibración mecánica inestable imposibilitando la capacidad de reconocer patrones.

La zona de mayor interés se encuentra en la frecuencia de 190 Hz, dado a su varianza en el valor del número de subdivisiones M contrastando con el resto de las frecuencias analizadas, por lo que, se

propone en trabajos futuros implementar otro solenoide con capacidad de operar a frecuencias mayores al umbral de 400 Hz y averiguar cómo continua la tendencia de los patrones generados.

Tabla 2. Visualización de patrón de vibración mediante visión computacional.

Frecuencia [Hz]	Imagen	Simulación de patrones		FFT
		Vista superior [13][14]	Visualización 3D [13][14]	
159				
190				
290				
310				

4. Conclusiones

El solenoide permite de manera controlada ejecutar movimiento rectilíneo oscilante a una frecuencia determinada, no obstante, al ser su funcionamiento a base de inducción magnética existe un umbral delimitante que impide el correcto funcionamiento del embolo a frecuencias superiores a 400 Hz al solaparse los campos magnéticos; Se propone en trabajos futuros implementar solenoides con menor tiempo de respuesta brindando la capacidad de extender el análisis a frecuencias mayores de 400 Hz. El uso de técnicas computaciones indaga en un análisis matemático profundo de las perturbaciones y regiones de vibración obtenidas por el movimiento oscilante obteniendo de forma matemática y simulada en visualización 2D y 3D el aumento de la amplitud en la formación de arena en las frecuencias de 310 Hz y 159 Hz al coincidir con el modo de frecuencia de vibración de la placa metálica, producido una resonancia que multiplica la intensidad de vibración permitiendo determinar de manera dinámica las frecuencias a los cuales reacciona la placa en base a los modos de vibración determinados en simulaciones 3D, con aplicación a diversos campos de la ingeniería civil como análisis de estructuras, puentes y pasos peatonales.

Referencias

[1] Mejia Reales, Jose & Universidad, Reales & De, Nacional & Facultad, Colombia & Ciencias, D. (2019). universidad nacional de colombia estrategia didáctica para el estudio de la frecuencia de las ondas sonoras emitidas por un instrumento típico de la música vallenata: la guacharaca.

[2] Malviya, Atul Kumar & Chary, S & Wani, Kiran. (2020). Modal Analysis of Chladni Plate Using Cymatics. 10.4271/2020-28-0320.

[3] Tuan, P. H., Lai, Y. H., Wen, C. P., Huang, K. F., & Chen, Y. F. (2018). Point-driven modern Chladni figures with symmetry breaking. Scientific Reports, 8(1). https://doi.org/10.1038/s41598-018-29244-6

[4] Borković, A., Milašinović, D. D., Golubović-Bugarski, V., Mijatović, O., & Desančić, M. (n.d.). *Experimental and numerical identification of structural modes for engineering education*. https://doiserbia.nb.rs/Article.aspx?id=0354-46051402161B

[5] Rzepecki, J., Chraponska, A., Budzan, S., Isaac, C. W., Mazur, K., & Pawelczyk, M. (2020). Chladni figures in modal analysis of a Double-Panel structure. Sensors, 20(15), 4084. https://doi.org/10.3390/s20154084

[6] Tuan, P. H., Wen, C. P., Chiang, P. Y., Yu, Y. T., Liang, H. C., Huang, K. F., & Chen, Y. F. (2015). Exploring the resonant vibration of thin plates: Reconstruction of Chladni patterns and determination of resonant wave numbers. The Journal of the Acoustical Society of America, 137(4), 2113–2123. https://doi.org/10.1121/1.4916704

[7] Tufoi, Marius & Gillich, Gilbert-Rainer & Praisach, Zeno-Iosif & Ntakpe, Jean Louis & Hatiegan, Cornel. (2014). An Analysis of the Dynamic Behavior of Circular Plates from a Damage Detection Perspective. Romanian Journal of Acoustics and Vibration. 11. 41-46.

[8] Transformada rápida de Fourier - MATLAB fft- MathWorks América Latina. (n.d.). https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html

[9] Powell, R. E. (1982). Multichannel inverse filtering of machinery vibration signals (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

[10] A._Borkovic, D. Milasinovic, V. Golubovic-Bugarski, O. Mijatovic, y M. Desancic, «Experimental and numerical identification of structural modes for engineering education», Facta Universitatis - Series Architecture And Civil Engineering, vol. 12, n.o 2, pp. 161-172, ene. 2014, doi: 10.2298/fuace1402161b.

[11] A._M. Hosseini, S. Arzanpour, F. Golnaraghi, y A. M. Parameswaran, «Solenoid actuator design and modeling with application in engine vibration isolators», Journal Of Vibration And Control, vol. 19, n.o 7, pp. 1015-1023, mar. 2012, doi: 10.1177/1077546311435517.

[12] Hosseini AM, Arzanpour S, Golnaraghi F, Parameswaran AM. Solenoid actuator design and modeling with application in engine vibration isolators. Journal of Vibration and Control. 2013;19(7):1015-1023. doi:10.1177/1077546311435517

[13] Dashti, S., Prakash, E., Navarro-Newball, A. A., Hussain, F., & Carroll, F. (2022). Chladni plate visualisation.

[14] Fernando (2024). PlotCircMembrane.m (https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47086-plotcircmembrane-m), MATLAB Central File Exchange. Recuperado 8 septiembre, 2024.

[15] Ikpe, A. E., Ndon, A. E., & Etuk, E. M. (2019). Response variation of chladni patterns on vibrating elastic plate under electro-mechanical oscillation. Nigerian Journal of Technology, 38(3), 540-548.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 39, pp. 553 - 566.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Diseño de Sistema Domótico con Visión Artificial para el Reconocimiento de Lengua de Señas Mexicanas

Enoc Isai Martinez Jimenez, Carlos Alberto Toro Arcila, Josué Gómez Casas, Jesús Salvador Galindo Valdés, Daniela Estefanía Ortiz Ramos, Oziel Gómez Casas, Jesús Fernando Martínez Villafañe y Carlos Rodrigo Muñiz Valdez.

Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Coahuila.
*J. Gómez Casas: jogomezc@uadec.edu.mx.

Resumen

Actualmente, las personas sordas toman un papel importante en nuestra comunidad, hoy existe un gran número de ellas en el mundo y la mayoría no tienen acceso eficiente a la tecnología que les pueda ayudar a comunicarse y/o mejorar su calidad de vida. Debido a lo anterior, el objetivo de esta investigación es diseñar e implementar un sistema domótico que mediante el uso de la lengua de señas mexicana y la visión artificial pueda comunicarse con dispositivos electrónicos (un foco y ventilador), considerando cualquier tipo de iluminación y ambiente, es decir, en condiciones con iluminación natural o eléctrica de día, así como también en condiciones de noche, en el cual la iluminación es nula o de baja intensidad. La identificación utilizará cámaras tipo IP "Internet Protocol" (Protocolo de Internet) para interiores y equipadas con leds infrarrojos para visión nocturna. Mediante este diseño se obtuvo una precisión del sistema al momento de detectar las señas dadas de un 94% en condiciones de día y un 90% en la noche, además de comunicaciones eficientes y rápidas con los dispositivos electrónicos. Con estas precisiones se pudieron detectar señas de forma confiable reduciendo el porcentaje de error en cualquier condición de iluminación.

Palabras clave: Visión artificial, domótica, lengua de señas mexicana, personas sordas, machine learning.

1. Introducción

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) [1], 430 millones de personas sufren discapacidad auditiva y sordera según los datos reportados hasta el año 2024, por otra parte, los datos de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI) [2], reportan que solo un 2% de esta población tiene acceso a tecnología para comunicarse y mejorar su calidad de vida. De igual manera, de acuerdo con las cifras más recientes del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) registradas en 2020 [3], revelan que en México hay un millón 350 mil 802 personas sordas, de las cuales 710 mil 405 son hombres y 640 mil 397 mujeres. En México, aproximadamente 2.3 millones de personas padecen discapacidad auditiva, de las cuales más del 50% son mayores de 60 años; poco más del 34% tienen entre 30 y 59 años y cerca del 2% son niñas y niños. Ahora bien, según datos proporcionados por el Centro de Rehabilitación y Educación Especial (CREE) localizado en Saltillo Coahuila, en la actualidad existe un 4.3% (134,816) de personas con discapacidad en Coahuila, el 20.1% (27,098) de personas corresponden a personas sordas.

Considerando lo anterior, la lengua de señas sirve como un medio de comunicación con personas sordas. Sin embargo, se carece de la implementación tecnológica para aplicaciones de comunicación con personas sordas que faciliten su cotidianidad y accesibilidad. Esta problemática motiva a la creación de sistemas de comunicación basados en herramientas de ingeniería para su interacción con su entorno de forma adecuada. La propuesta de esta investigación radica en el diseño e implementación de un sistema domótico capaz de interpretar la lengua de señas mexicano, sin la necesidad de emitir sonidos o interpretaciones vocales para controlar aparatos electrodomésticos y/o electrónicos, utilizando herramientas de visión por computadora y algoritmos de inteligencia artificial. Actualmente, los sistemas

domóticos comerciales (Alexa, Google Home, Siri, etc.) se activan mediante comunicación verbal, sin embargo, en la actualidad, no existen sistemas capaces de reconocer la lengua de señas mexicana para controlar un entorno o vivienda para el caso específico de personas sordas. El diseño de un sistema domótico usando la lengua de señas pretende mejorar la cálida de vida de las personas sordas mediante la asistencia tecnológica de comunicación y control de entornos. La hipótesis de la investigación se basa en el uso de técnicas de Machine Learning (Aprendizaje Automático) utilizando visión artificial, para controlar dispositivos electrónicos mediante el uso de la lengua de señas mexicana para personas sordas.

Según investigaciones realizadas en los últimos años, diseñar sistemas que reconozcan o interpreten la lengua de señas ha sido un desarrollo con avances importantes, como es el caso de Mundewadi y colabroradores [4] quienes realizaron un sistema domótico basado en la interfaz de un guante en la mano que controlaba distintos dispositivos electrónicos. Por otro lado, autores como Chithra y colaboradores [5], que, en el año 2020, utilizaron un guante especial con sensores que detectan números realizados por las manos para controlar dispositivos electrónicos. En el caso del trabajo reportado por Oz & Leu en 2011 [6], los cuales utilizaron un guante especializado de la marca Cyberglove entrenado para el reconocimiento de palabras en lengua de señas mediante el uso de redes neuronales artificiales.

Aunque estos sistemas funcionan de forma correcta, las personas que lo utilizan dependen del uso de guantes en sus manos en todo momento, es por ello que pasando a investigaciones enfocadas en el reconocimiento de la lengua de señas usando visión artificial los investigadores Naranjo, Alarcon-O, Amancha-P, Ortiz-Espinosa, y Naranjo [7] realizaron un sistema a bajo costo para la detección de letras del alfabeto del idioma latín y funcionar como un traductor de esta lengua a texto, éste sistema detecta mediante el uso de visión artificial cada letra del alfabeto, dando como resultado un promedio de 905.88 milisegundos para el reconocimiento de cada letra. Igualmente, en 2015 en el trabajo reportado por Galicia, R. y otros investigadores [8] utilizaron un sensor de movimiento detectando el esqueleto de la mano humana mediante imágenes y obteniendo la identificación de cada letra en la lengua mexicana, con este sistema se precisó el 76.19% en el reconocimiento de cada señal.

En los últimos años, el uso de las redes neuronales se ha convertido una de las herramientas principales para este tipo de sistemas de reconocimiento de lenguajes o gestos, tales como el trabajo reportado por Agnihotri & Arora en el año 2023 [9] quienes, mediante una red neuronal convolucional y segmentación de la mano en escala de grises, detectan gestos realizados por las manos, obteniendo una precisión del 94% para gestos estáticos y un 92% con gestos en movimiento de la lengua de señas.

Otra de las herramientas más importantes en esta área, fue el uso de la librería MediaPipe como fue reportado por Tomar, D. y otros colaboradores [10], quien a través de esta librería fueron capaz de detectar letras del alfabeto mexicano y Farhan & Madi en 2022 [11] detectaron 12 señas con movimiento en la legua de señas americano con una precisión del 97.2%, sin embargo, el uso de esta detección de gestos y lenguajes no solo se limita al control de sistemas domóticos y el reconocimiento para traductores. En el caso de Grif & Turc, 2018 [12] y Grif & Farcas en el 2016 [13] quienes usaron el reconocimiento de gestos por medio de la librería MediaPipe para el control de un *mouse* virtual para la mejora y eficiencia del uso de computadoras o laptops, en su investigación, mediante gestos controlaron parámetros como los niveles de volumen, selección de texto, *zoom* en pantalla, entre otros.

El objetivo de esta investigación es crear un asistente domótico para personas sordas mediante el reconocimiento de la lengua de señas mexicana mediante el uso de técnicas de Machine Learning (Aprendizaje Automático) y visión artificial para controlar dispositivos electrónicos. Por lo que se requiere del diseño e implementación de una interfaz hombre-maquina capaz de interpretar la lengua de señas mexicana para la comunicación de dispositivos electrónicos dirigido a personas sordas, lo anterior, utilizando un modelo de redes neuronales para la identificación de señas en entorno bajo condición de iluminación de día y de noche.

Las secciones del artículo se dividen de la siguiente manera: en la Sección 2 se presenta la metodología utilizada en este proyecto, la Sección 3 se abordan los detalles de la red neuronal en el

entrenamiento, la Sección 4 muestran los resultados experimentales obtenidos en entornos reales y finalmente en la Sección 5 se discuten las conclusiones de este trabajo de investigación.

2. Metodología

En la Figura 1, se presenta el esquema de la metodología implementada para la realización de esta investigación.

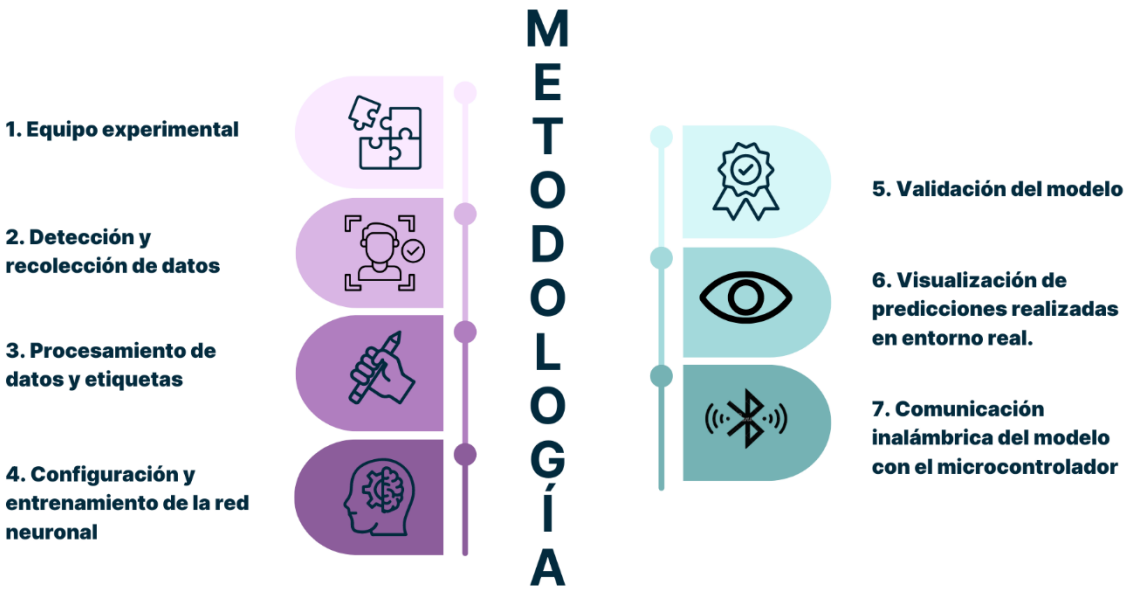


Figura 1: Diagrama de metodología para el diseño y la implementación del sistema domótico con visión artificial para el reconocimiento de la lengua de señas mexicana.

2.1 Equipo experimental

Para esta investigación se utilizó una Laptop Hewlett-Packard (HP) con procesador *11th Gen Intel® Core™ i3-1115G4 @ 3.00GHz*, 8GB de memoria *RAM*, con sistema operativo Windows 11 Home Single Language version 22H2 de 64 bits y procesador x64.

Para la adquisición de imagenes se usaron tres cámaras, una webcam y dos cámaras IP "Internet Protocol" (Protocolo de Internet), la primera es una webcam de la marca ACTECK modelo WM20, ésta cámara cuenta con una resolución de video de 720p (1280*720)/30 fps (frames por segundo), contiene un sensor H62 1.0M con un enfoque fijo y una alimentación de DC 5V 120mA, es importante mencionar que cuenta con tecnología Plug & Play (conectar y usar), con conectarla a un dispositivo, como una laptop o computadora de escritorio (PC) funciona correctamente.

La primera cámara IP usada es de la marca Icsee, cuenta con 4MP y FullHD de resolución, esta cámara incluye visión nocturna infrarroja y a color, además, es óptima para entornos interiores.

También se utilizó una cámara IP de la marca IMOU modelo DK2 2MP, con calidad FullHD, 2MP de resolución, visión nocturna infrarroja, la cual, también es óptima para entornos interiores únicamente, las cámaras mencionadas se observan en la Figura 2.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 39, pp. 553 - 566.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Figura 2: Cámaras utilizadas en el desarrollo experimental para la implementación del sistema domótico por visión artificial.

Los entornos usados para la implementación del sistema domótico fueron los siguientes: el primero emulando un entorno de oficina de trabajo, que recibía luz solar y luz artificial a través de lámparas fluorescentes y el otro entorno, emulando una habitación en el que se trabajó por la noche para evitar luz que afectara las pruebas realizadas en horas de noche.

2.2 Detección y recolección de datos

Para detectar los puntos característicos (*keypoints*) del cuerpo humano, el cual será el encargado de realizar las señas correspondientes, se usó la biblioteca MediaPipe (versión 0.10.9), OpenCV (versión 4.9.0) como bibliotecas principales y Python (versión 3.11.7) como lenguaje de programación. Hoy en día estas bibliotecas son muy populares en temas de visión artificial y detección de características del movimiento del cuerpo humano. MediaPipe es una librería open source (de código abierto) creada por la empresa Google LLC, la cual puede detectar puntos importantes del cuerpo para la detección de poses, señas, movimientos, entre otras acciones. Para esta investigación se usó el modelo *Holistic*, este modelo es el más completo ya que puede detectar 543 puntos en todo el cuerpo humano, estos puntos se dividen en:

- 468 puntos de referencias en el rostro.
- 33 puntos de referencia de postura.
- 21 puntos de referencias en cada mano.

Además, se usó la función *drawing_utils*, con la que se muestran e identifican de forma visual y distinguible los puntos de referencia ya mencionados.

OpenCV, también de código abierto, fue desarrollado por Intel, esta biblioteca se utilizó para la visualización en tiempo real de los movimientos corporales mediante el procesamiento y la visualización de las imágenes adquiridas por la cámara, al igual que para la visualización de los resultados, esta biblioteca tiene el beneficio de poder conectarse mediante cámaras USB o mejor conocidas como Webcams y también a cámaras por medio de IP.

Para la recolección de datos se empleó OS, un módulo integrado por el lenguaje Python, capaz de interactuar con el sistema operativo en el que se está programando, este módulo se usó para crear las carpetas en las que se almacenaron los datos de la recolección de las señas realizadas por la persona. Las carpetas antes mencionadas fueron etiquetadas por un nombre correspondiente a cada acción con la librería Numpy a través de una lista de elementos que podríamos definir como un estante de almacenamiento. Para este proyecto fueron cuatro las carpetas creadas, las cuales corresponden a las señas “LigthOn, LigthOff, AirOn, AirOff” que en español se traduce como “Luz prendida, Luz apagada, Aire prendido, Aire apagado”, respectivamente. Las señas se escribieron en la pantalla de

visualización en idioma inglés por temas de facilidad de visualización en el proceso de predicción con el modelo en tiempo real.

Una vez que se obtuvo el conjunto de datos, con un número de secuencia de 100 y un número de 40 frames por cada secuencia, a continuación de define detalladamente el procedimiento.

Primero se obtiene una secuencia de 100 acciones, esto significa que cada carpeta con el nombre de la señal tendrá internamente 100 carpetas, y por último dentro de cada carpeta internas habrá 40 archivos de tipo Numpy, el cual tendrá las coordenadas de los puntos clave detectados por MediaPipe en el espacio de la grabación, estas carpetas serán las que se usarán para el entrenamiento del modelo. Teniendo el conjunto de datos con todos los ejemplos de las señales se pasa al procesamiento de los datos y las etiquetas.

2.3 Procesamiento de datos y etiquetas

Para poder procesar los datos almacenados se utilizó la función *sklearn.model selection* de la librería scikit-learn, de la cual se importa la función *train_test_split*, la cual permite dividir el conjunto en dos partes, la primera es parte del entrenamiento con un 80% (320 secuencias) y la segunda que será la de la validación con el 20% (80 secuencias). Además, se empleó la librería keras.utils en conjunto con la función *to_categorical*, que se utiliza para convertir matrices de etiquetas en una representación de tipo categórico. Esta función es comúnmente utilizada en problemas de clasificación multiclase cuando las etiquetas se representan como enteros. La función convierte estos enteros en una codificación “one-hot”, el cual es un formato binario en el que cada clase está representada por un vector binario único y facilita el aprendizaje automático para ciertos algoritmos.

Con los datos divididos en entrenamiento y validación, además de tener binarizada cada etiqueta, se procedió a la configuración y el entrenamiento de la red neuronal.

2.4 Configuración y entrenamiento de la red neuronal

Para la construcción de la red se utilizó TensorFlow.keras (tf.keras) en su versión 2.16.1. TensorFlow es un entorno (framework) para el aprendizaje automático desarrollado por la compañía Google LLC. Por otro lado, también se utilizó Keras, que es una interfaz de programación de aplicaciones (API) del framework TensorFlow, además, es una biblioteca de alto nivel para redes neuronales la cual fue diseñada para ser fácil de manejar, modular y extender. Con las herramientas descritas anteriormente, se construirán y entrenarán los modelos utilizando la API de Keras, pero con la potencia y flexibilidad de TensorFlow.

Para esta red se utilizó el módulo *keras.models* del cual se importa el modelo Sequential, el cual organiza las capas en una lista lineal, donde cada capa tiene exactamente un tensor de entrada y un tensor de salida. Es el tipo de modelo más simple y comúnmente utilizado en Keras para construir redes neuronales.

También se usó el módulo *keras.layers* y se importó LSTM y Dense. De acuerdo con [14] LSTM (Long short-term memory) “*es un tipo de red neuronal recurrente (RNN) que se utiliza en el aprendizaje profundo para procesar y predecir secuencias de datos. La LSTM fue diseñada para abordar el problema del desvanecimiento del gradiente en las redes neuronales recurrentes tradicionales, que se producen cuando se retropropaga el error a través de múltiples capas y se pierde información importante en el proceso. La LSTM usa una estructura de celda con puertas y permite a la red controlar la información almacenada y olvidada en cada paso de tiempo, especialmente adecuada para procesar secuencias de datos a largo plazo.* La capa Dense se conectó completamente con cada neurona anterior, para realizar transformaciones lineales y no lineales en los datos. Por último, de *keras.callbacks* se importó TensorBoard el cual ayuda a la visualización, mediante gráficas, de los valores obtenidos durante el entrenamiento en cuestión de precisión y perdida.

Antes de pasar a la configuración de la red, se creó una carpeta en la que se almacenan los parámetros de entrenamiento y validación de la red, lo anterior, usando TensorBoard. Además de almacenar los parámetros, ayudará a visualizar las gráficas de entrenamiento antes mencionadas.

La configuración de la red se compone de tres capas, la capa de entrada, las capas ocultas y por último la capa de salida, estas capas se agregaron usando el método *model.add*. Para el modelo se utilizaron dos funciones de activación, ReLU (Rectified Lineal Unit) que en español se traduce como Unidad Lineal Rectificada y SoftMax. La activación de tipo ReLU umbraliza los valores de entrada en 0, devolviendo 0 para los valores negativos y para los mayores a 0 se les mantiene la propia entrada como se muestra en la Figura 3, lo cual permite no modificar la escala de los valores de entrada positivos y permite que el gradiente trabaje sin cambios durante la retropropagacion, mitigando así el desvanecimiento del gradiente, esta explicación se puede expresar mediante la Ecuación 1.

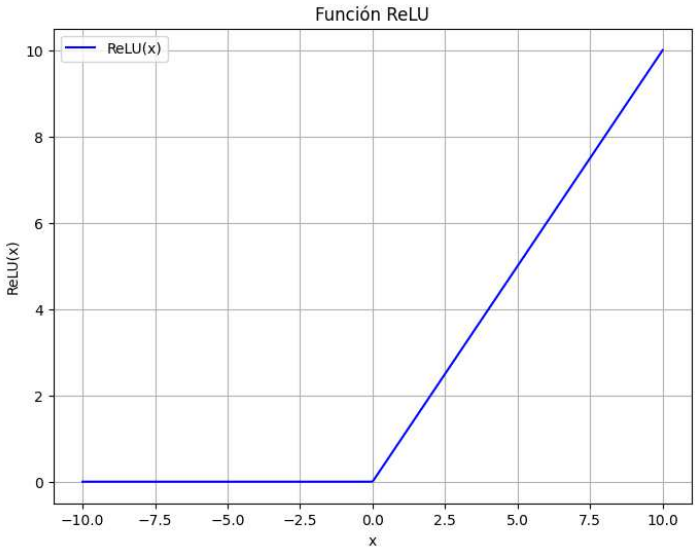


Figura 3: Diagrama de activación de la función ReLU.

$$f(x) = max(0, x) \tag{1}$$

La activación SoftMax, también conocida como función exponencial normalizada, por el tipo de gráfica que la representa (ver Figura 4), se utilizó solamente para la capa de salida, esta función es muy útil en problemas de clasificaciones multiclase, por lo tanto, se optó por esta activación en la capa de salida, la activación de la función se rige mediante la Ecuación 2.

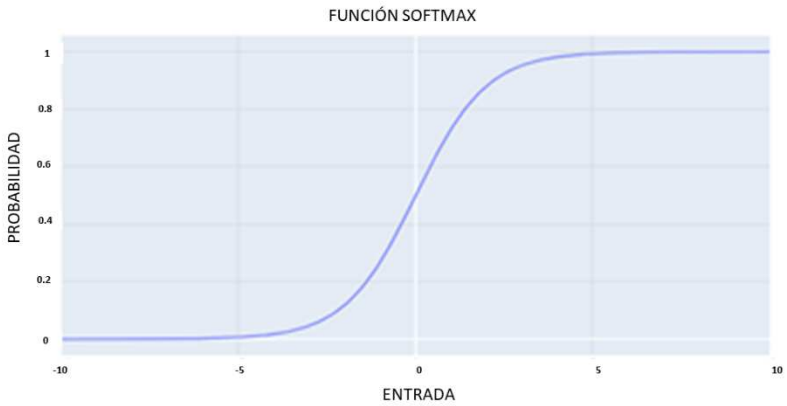


Figura 4: Diagrama de activación de la función SoftMax [15].

$$softmax(z_i) = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^{K} e^{z_j}} \tag{2}$$

2.4.1 Configuración de las capas

Para la capa de entrada del tipo LSTM, se usaron 64 neuronas, como se muestra en la Figura 5, se le aplicó un retorno de secuencia, se usó una activación ReLU con un tamaño de entrada de 40,1662, estos valores corresponden a los 40 frames y la cantidad de puntos clave.

En las capas ocultas se usaron 5 capas, con las siguientes configuraciones: para la primera capa, una red de tipo LSTM con 64 neuronas con un retorno de secuencia y una activación tipo ReLU, esta activación se utilizó en cada capa oculta, la segunda capa, una red tipo LSTM con 32 neuronas sin retorno de secuencia, para la tercera, cuarta y quinta capa se usó una red tipo Dense con 32 neuronas.

Por último, para la capa de salida se usó un tipo de red Dense, donde el número de neuronas depende de las señales que serán reconocidas, para el objeto de estudio de esta investigación, fueron 4 y, para terminar, se utilizó SoftMax como función de activación.

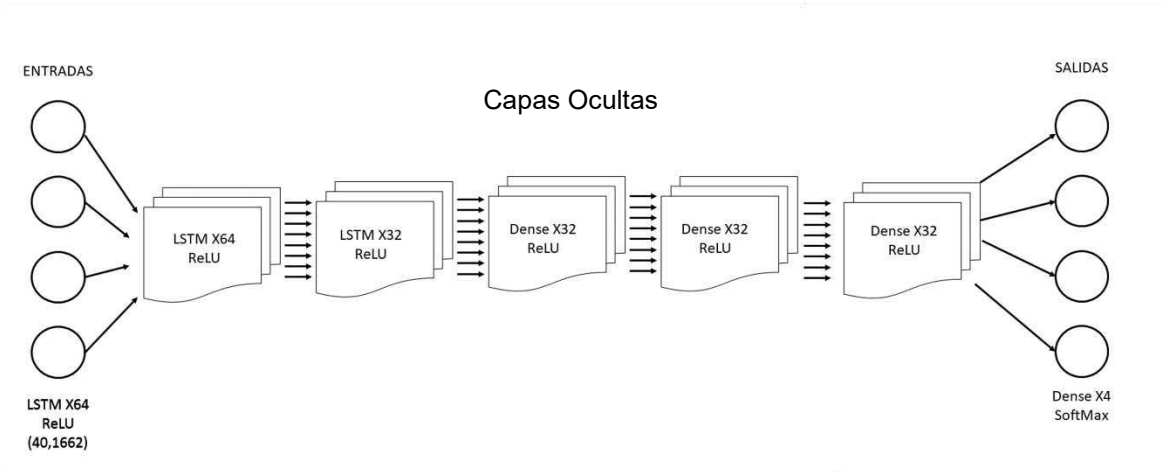


Figura 5: Diagrama de la red neuronal usada para el entrenamiento.

2.4.2 Configuración del proceso de entrenamiento

Para este paso se utilizó el módulo *compile* con el cual se configura el procesamiento de la red, utilizando como parámetros, un optimizador Adam (Adaptive Moment Estimation) traducido como Estimación Adaptativa de Momentos en español. Este optimizador es un algoritmo flexible y adaptativo que ha demostrado que funciona correctamente en problemas de aprendizaje profundo, útil en problemas donde los datos son escasos o ruidosos o donde las tasas de aprendizaje adaptativas son beneficiosas. Como función de perdida, se utilizó la función *categorical_crossentropy* ,la cual es una función de pérdida adecuada para problemas de clasificación multiclase con clases mutuamente excluyentes, donde las etiquetas están codificadas en un formato one-hot. Su objetivo es minimizar la discrepancia entre las predicciones del modelo y las etiquetas verdaderas durante el entrenamiento. Por último, se utilizó *categorical_accuracy*, con este parámetro de métrica se calculó y se registraron los valores de precisión del modelo durante el entrenamiento.

2.4.3 Entrenamiento de la red

Como ultimo método para entrenar la red, se utilizó *fit,* el cual es el método encargado de entrenar la red, en este método se le entregan como parámetros, los valores de entrenamiento de entrada y salida, así como un batch size (Tamaño de lote) de 30 muestras, el cual se encargó de pasar este batch size a la red para calcular el gradiente en cada iteración, esto ayuda a aprovechar la eficiencia computacional. Para las épocas se le asigna un valor de 80, esto significa que los datos de entrenamiento dieron 80 iteraciones completas por la red. Para evaluar que la red aprenda y no memorice, se usaron los datos de entrada, los datos de salida de la validación y se accedió a la carpeta con los parámetros de entrenamiento y validación final para visualizarse gráficamente.

2.5 Validación del modelo

Finalizado el entrenamiento del modelo, se pasó a la etapa de visualización, primero se guardó el modelo mediante el método save, el cual debe tener un nombre (en nuestro caso lleva el nombre “Prueba”) seguido de la extensión .keras, y mediante la importación del método load_model se manda llamar el modelo entrenado para su validación.

Con el método *predict* se manda llamar a las predicciones realizadas en los datos de entrada de validación, estas predicciones se almacenan en una variable, la cual se usó para verificar que los valores de entrada y salida de validación estuvieran correctos, así como también, obtener las probabilidades con mayor porcentaje dentro de las opciones mediante el uso de la función *argmax*.

2.6 Visualización de predicciones realizadas en entorno real

Mediante un entorno visual, desarrollado con OpenCV, se visualiza el porcentaje de confiabilidad de la predicción del modelo en un entorno real, estos porcentajes se representan mediante una barra de llenado en la ventana de muestreo que dependiendo de la probabilidad, rellena el espacio de la señal que se está realizando como se puede observar en la Figura 6, se estableció un umbral (treshold) de más del 80% del nivel de confiabilidad de la predicción para tomar una señal como valida, de lo contrario es una señal no valida, lo anterior, como medida de seguridad y evitar errores o confusiones de señas, terminado este umbral, se escribe el nombre de la señal en la parte superior de la ventana. Como otra medida de seguridad y pensando en si una persona realizara dos o más veces la misma señal, se estableció otra regla; si la señal realizada es igual la última predicción detectada, no se realizará ninguna instrucción posterior.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 39, pp. 553 - 566.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Figura 6: Visualización del llenado de la barra de probabilidad.

2.7 Comunicación inalámbrica

Para la comunicación de las predicciones hechas por el modelo y los dispositivos que se controlaron, se usaron los siguientes componentes:

- Un módulo ESP32 Bluetooth y Wifi.
- Un relevador (relé) de dos módulos Arduino.
- Cableado eléctrico.
- Una roseta con un foco.
- Un ventilador de aire doméstico.

Para la programación de la tarjeta ESP32 y los relevadores se usó el entorno de Arduino (versión 1.8.18), en este entorno solo se controlaron los datos obtenidos mediate la librería BluetoothSerial.h, la cual se encargó de comunicarse vía Bluetooth. Para esta comunicación entre Python y Arduino se usó la librería Serial en Python y la librería BluetoothSerial.h, en lo que se refiera a la programación desde Python, se accedió a los índices de cada señal, al ser almacenados en una lista que contienen un número de índice, los cuales son:

- Para LigthOn el número 0.
- Para LigthOff el número 1.
- Para AirOn el número 2.
- Para LigthOff el número 3.

Una vez obtenidos los índices, dependiendo de la probabilidad mediante una validación condicional, se determina que, si se obtiene el número 0, mande una letra, en el caso de este índice se mandó la letra A, mediante la función *write* y el método *encode* que se encarga de codificar la letra y mandarla para ser recibida por Arduino usando la función *read*. Una vez enviada la letra a Arduino, con una estructura condicional tipo switch, se enciende o apaga el aparato deseado.

Para las conexiones eléctricas de los relevadores con el módulo ESP32 y los dispositivos eléctricos, se siguió el diagrama de conexiones mostrado en la Figura 7.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 39, pp. 553 - 566.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

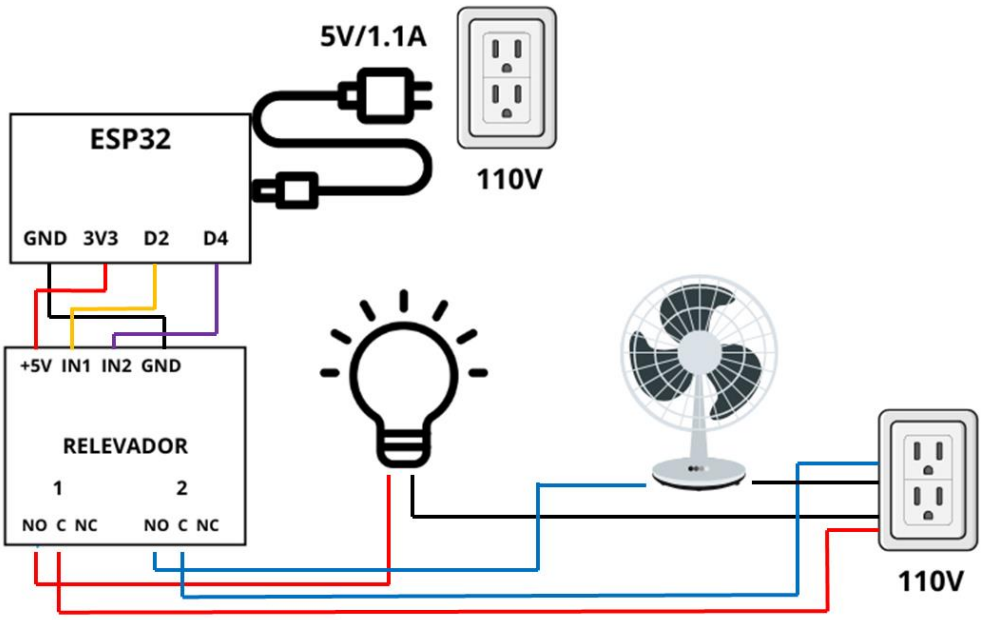


Figura 7: Diagrama eléctrico para la conexión inalámbrica.

Como se muestra en el diagrama anterior se procede a explicar las conexiones de los dispositivos eléctricos con el relevador, el relevador tiene nomenclaturas tales como NO, C y NC, NC (Normally Close) significa normalmente cerrado, este tipo de contacto es el que permite el paso del flujo de energía al unir sus dos platinos interno, NO (Normally Open) es un contacto normalmente abierto que a diferencia de NC impide el paso de la energía y por último C (common), que significa común, su función es actuar como el punto de contacto central que se conecta con uno de los otros dos terminales (NO o NC) dependiendo del estado del relé.

Después, sigue la conexión de los dispositivos, como se mencionó anteriormente, se trabajó con un módulo relé doble, en el diagrama se ve un número 1 y 2 en el recuadro del relevador, especificando el número del módulo. El módulo 1 se conectó al foco mediante una roseta eléctrica, un cable de línea (mostrado en color rojo), sale del foco para ser conectado a NO, el terminal común va directamente a una conexión eléctrica domestica de 110 o 220 V (Voltios) en su terminal de fase. Y por último del foco sale un cable de tipo neutro (color negro) a la conexión eléctrica doméstica. Este mismo proceso se repite para el módulo 2 que va conectado al aire.

Para las conexiones del relevador con la tarjeta ESP32 se utilizaron los pines digitales 2 y 4 de la tarjeta y fueron conectados respectivamente a los IN1 e IN2 (entradas) del relevador que son los que se muestran en color amarillo y morado. Se conectaron el pin GND (negativo) al GND del relevador y el pin de 3.3V a el pin de voltaje del relevador, este relevador puede trabajar con 3.3v y 5v DC (corriente directa) ya que permite controlar un circuito de alta potencia o corriente con una señal de baja potencia. Por último, se conecta la tarjeta mediante un transformador de voltaje que reduce un voltaje de 110/220V a uno de 5V.

3. Resultados del entrenamiento de la red neuronal

Analizando las gráficas dadas para el proceso de entrenamiento de la red, se definieron dos métricas de interés, la primera “epoch categorical accuaracy” (precisión categórica por épocas), la cual permitió observar la precisión categórica de la red durante cada época de entrenamiento y validación. Esto significa, que se evalúa la precisión de clasificación para cada categoría conforme aumentan las

épocas, esta gráfica asciende conforme pasan las épocas y el comportamiento ideal debe ser una función creciente y al final las curvas de entramiento y validación deben tener valores cercanos a 1 como se muestra en la Figura 8 la cual en la parte del eje vertical “y” muestra el porcentaje que se obtienen en cada época la cual es mostrada en el eje horizontal “x”. En este caso, el modelo entrenado obtuvo una precisión categórica de 94% en su última época. Se puede observar también, que los datos de entrenamiento (línea de color naranja) y los datos de validación (línea color azul) tienen un comportamiento creciente y su forma es muy parecida, lo cual indica que se está evitando el sobreajuste (overfitting, en inglés), el cual sucede cuando los datos de validación tienden a ir de forma descendente y los de entrenamiento ascendente. Además, se está evitando el subajuste (underfitting, en inglés), el cual se presenta cuando ambas curvas presentan comportamiento descendente.

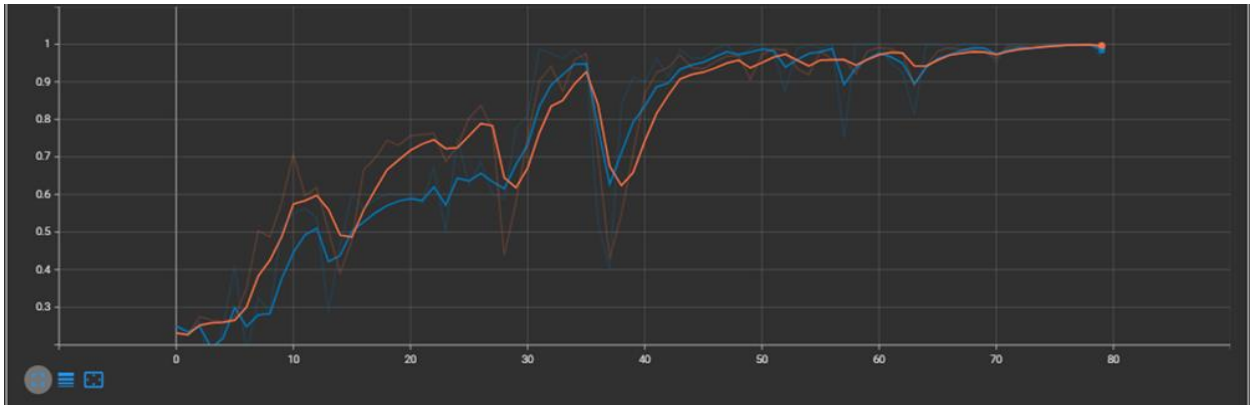


Figura 8: Gráfica de precisión categórica en cada época.

Para la función de costo se utilizó la gráfica de “epoch loss” (perdida por época), los resultados de los datos tanto de validación (color azul) como entrenamiento (color naranja) presentan un comportamiento decreciente hasta llegar a un valor cercano a cero en la época 78, lo que indica que el modelo está obteniendo el comportamiento deseado como se muestra en la Figura 9.

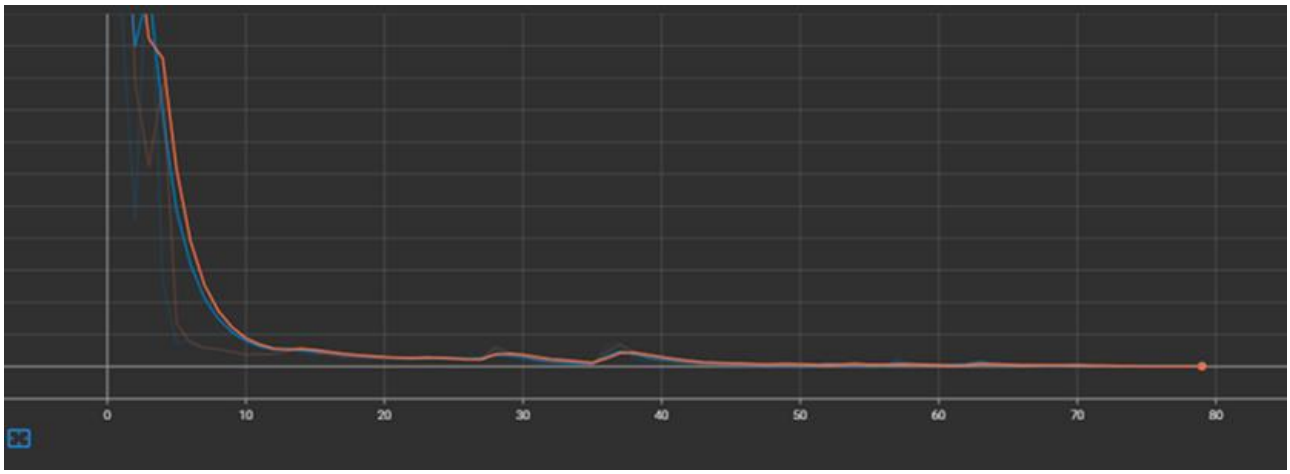


Figura 9: Grafica de perdida por época.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 39, pp. 553 - 566.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

4. Resultados del modelo en un entorno real

Para validar el desempeño del modelo, se realizaron pruebas en los dos entornos mencionados en la Sección 2.1. El primer experimento se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Automatización de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Coahuila, en horas de la tarde (12:00 a 14:00 hora Monterrey, México) cuando aún se cuenta con iluminación solar, además se utilizaron las luminarias del laboratorio. Se realizaron pruebas con las cuatro señales: encender luz, apagar luz, encender aire y apagar aire. Para este experimento se utilizó la cámara Webcam. Según el análisis, el modelo realiza correctamente la predicción de las señas ejecutadas por el usuario y la comunicación inalámbrica con los dispositivos funciona adecuadamente. En la Figura 10 se muestra al usuario ejecutando la seña de "Encender Luz" (LigthOn), también se muestra la barra de porcentaje de confiabilidad de la seña y, por último, la seña definitiva tomada por al algoritmo.

Figura 10: Resultado para la señal encender luz (LigthOn).

En la Figura 11, se presentan los resultados en el mismo escenario, pero ahora para la seña de “Encender Aire” (AirOn).

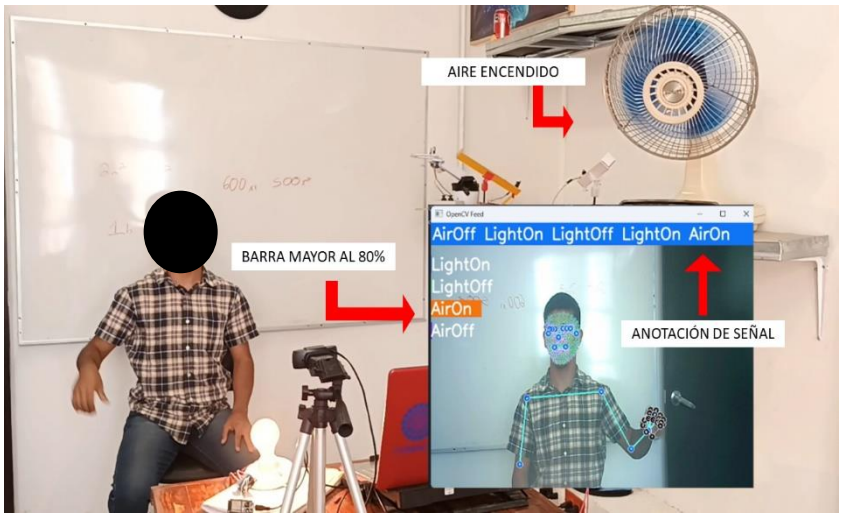


Figura 11: Resultado para la señal encender aire (AirOn).

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 39, pp. 553 - 566.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

El segundo experimento se desarrolló en una casa habitación, en horas de la noche (10:00 pm), sin luz solar ni iluminación artificial (luminarias, focos, etc.). Para este experimento se utilizaron las cámaras IP con la función de visión nocturna (infrarroja). Los resultados son similares a los del primer experimento descrito anteriormente, por lo que el modelo funciona en entornos tanto para el día y la noche, con iluminación y sin iluminación. En la Figura 12 se muestra que el modelo reconoció la seña de “Encender Luz” (LigthOn) y la comunicación con el dispositivo (foco), funcionó adecuadamente.

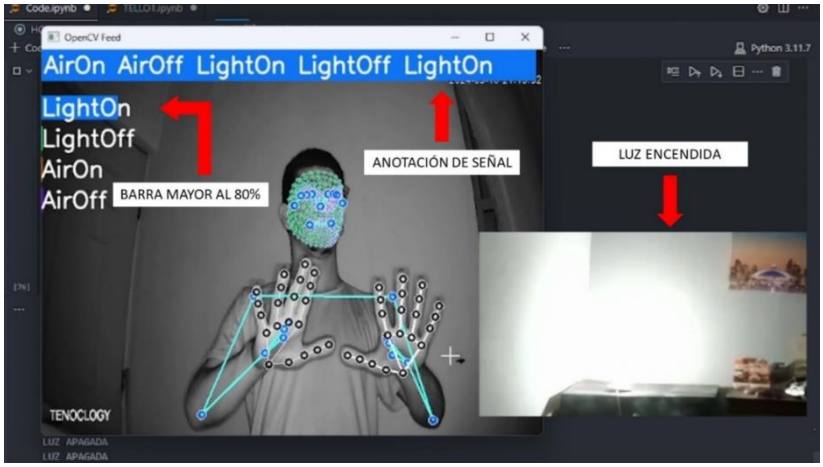


Figura 12: Resultado en entorno oscuro para la señal encender luz (LigthOn).

Los videos de la ejecución de los dos experimentos se pueden ver en el siguiente enlace: *https://youtu.be/BYTHWg-TJVk.*

5. Conclusiones

Según los resultados del sistema, se obtuvo un diseño innovador y único donde se realizó una interfaz hombre-máquina para comunicarse con dispositivos electrónicos, cabe destacar que funciona tanto con luz de día o ambiental como de noche o en oscuridad y promete ser una tecnología revolucionaria para las personas sordas.

En primer lugar, se estableció el equipo requerido para diseñar el sistema domótico con visión artificial para lograr el reconocimiento de la lengua de señas mexicana, como se menciona en el apartado 2.1, se debe destacar que se utilizaron diferentes entornos para la implementación del sistema domótico, en los cuales se aplicó la luz solar, luz artificial y oscuridad. Primero se realizó la detección y recolección de los datos para posteriormente realizar el procesamiento de datos y etiquetas, seguido se realizó la configuración y entrenamiento de la red neuronal.

En el caso de la red neuronal, la configuración se compone de tres capas: la capa de entrada, del tipo LSTM se usaron 64 neuronas y se le aplicó un retorno de secuencia, se usó una activación ReLU con un tamaño de entrada de 40,1662, estos valores corresponden a los 40 frames y la cantidad de puntos clave; las capas ocultas, se utilizaron cinco capas, las cuales se encuentran descritas en el apartado 2.4.1 y finalmente la capa de salida, se usó un tipo de red Dense, donde el número de neuronas depende de las señales que serán reconocidas, para el objeto de estudio de esta investigación, fueron 4 y, para terminar, se utilizó SoftMax como función de activación. Posteriormente se realizó un entrenamiento de la red y validación del modelo.

Los resultados obtenidos muestran que el modelo entrenado obtuvo una precisión categórica de 94% en su última época, y a su vez los datos de validación tienen un comportamiento creciente y similar

al modelo entrenado, lo anterior indica que se evita el sobreajuste y el subajuste. Para el entorno real se realizó en un ambiente de luz ambiental y artificial obtenido la respuesta esperada por el sistema domótico según la aplicación de las cuatro señales aplicadas: encender luz, apagar luz, encender aire y apagar aire; finalmente se realizó el mismo experimento pero cambiando la luz a un entorno de oscuridad, donde la respuesta del sistema a las mismas cuatro señales fue favorable, obteniendo que la red neuronal pudo detectar correctamente las señas, obteniendo porcentajes de precisión del 94% en promedio para iluminaciones en el día y un 90% para condiciones en la noche, además de comunicarse con los dispositivos electrónicos de forma inmediata y sin complicaciones.

Con esto se confirma que es posible diseñar sistemas domóticos usando visión artificial y la lengua de señas mexicana. Este sistema podrá ayudar a personas sordas a mejorar su calidad de vida, además de brindar una mayor autonomía diaria.

REFERENCIAS

World Health Organization: WHO. (2024, February 2). *Sordera y pérdida de la audición*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss

BrightSign: el guante inteligente que da voz a quienes no pueden hablar. (n.d.). https://www.wipo.int/wipo_magazine/es/2019/05/article_0005.html

Esto, R. P., Esto, R. P., & Esto, R. P. (2022, April 24). *¿Quiénes padecen más el problema de la Sordera en México? Esto dice el Inegi. Por Esto!* https://www.poresto.net/mexico/2022/4/24/quienes-padecen-mas-el-problema-de-la-sordera-en-mexico-esto-dice-el-inegi.html

Mundewadi, S. A., Dindore, P. N., Kamurti, L. B., Arole, K. V., & Gurav, V. V. *SIGN LANGUAGE TO SPEECH CONVERSION AND HOME AUTOMATION.*

Chithra Apoorva, D. A., Gowtham, B. S., Charishma, K., Teja, K. K., & Kumar, G. S. C. (2020). *Smart Glove: Sign to Speech Conversion and Home Automation Control for Mute Community*. International Journal of Engineering and Advanced Technology., 9.

Oz, C., & Leu, M. C. (2011). *American sign language word recognition with a sensory glove using artificial neural networks*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 24(7), 1204-1213.

Naranjo, A. E., Alarcon-O, A., Amancha-P, G., Ortiz-Espinosa, J., & Naranjo, J. E. (2021). *Low-cost assistive system for deaf people based on artificial vision*. Advances and Applications in Computer Science, Electronics and Industrial Engineering: Proceedings of CSEI 2020, 249-264.

Galicia, R., Carranza, O., Jiménez, E. D., & Rivera, G. E. (2015, June). *Mexican sign language recognition using movement sensor*. In 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (pp. 573-578). IEEE.

Agnihotri, A. R., & Arora, D. (2023, July). *Vision based Interpreter for Sign Languages and Static Gesture Control using Convolutional Neural Network*. In 2023 2nd International Conference on Edge Computing and Applications (ICECAA) (pp. 1611-1615). IEEE.

Tomar, D., Nauni, D., Zaidi, A. M., & Kaur, M. (2023, November). *Gesture-Controlled Home Automation for the Differently Abled: Enhanced Accessibility and Independence*. In 2023 3rd International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences (ICTACS) (pp. 1560-1564). IEEE.

Farhan, Y., & Madi, A. A. (2022, December). *Real-time dynamic sign recognition using mediapipe*. In 2022 IEEE 3rd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS) (pp. 1-7). IEEE.

Grif, H. S., & Turc, T. (2018). *Human hand gesture based system for mouse cursor control*. Procedia Manufacturing, 22, 1038-1042.

Grif, H. S., & Farcas, C. C. (2016). *Mouse cursor control system based on hand gesture*. Procedia Technology, 22, 657-661.

Qué es LSTM: Long short-term memory Concepto y definición. Glosario. (n.d.). GAMCO, SL. https://gamco.es/glosario/lstm-long-short-term-memory/

Ali, M. (2024, April 15). *Diagrama de la función de activación SoftMax* [Figura]. https://www.datacamp.com/es/tutorial/introduction-to-activation-functions-in-neural-networks

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 40, pp. 567 - 582.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Simulación de los Movimientos de un Robot Flexible Utilizando Actuadores Piezoeléctricos

Francisco Jesús Ramos García, Josué Gómez Casas, Esteban Guerra Bravo, Carlos Alberto Toro Arcila, Juan Carlos Anaya Zavaleta, Enoc Isai Martinez Jimenez, Jonathan Sebastian Obregón Flores, Juan Carlos Ortiz Cuellar y Oziel Gómez Casas

Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Coahuila.
*J. Gómez Casas: jogomezc@uadec.edu.mx.

Resumen

Los robots flexibles son diseñados con materiales hiperelásticos llamados elastómeros, con los cuales se logra la imitación del movimiento de sistemas biológicos como los tentáculos de un pulpo, la trompa de un elefante y el deslizamiento de una serpiente. El uso de actuadores tradicionales basados en principios neumáticos e hidráulicos es inadecuado por las grandes presiones y deformaciones que generan en las paredes del elastómero, en aplicaciones a pequeña escala en robótica flexible. La propuesta de este proyecto se basa en la simulación de actuadores de material piezoeléctrico para la generación de los movimientos de expansión, doblez y torsión de un robot flexible a pequeña escala. Para realizar la propuesta del diseño del robot flexible se utilizaron simulaciones de elementos finitos mediante el programa ANSYS para estudiar y validar sus movimientos, considerando la teoría de materiales piezoeléctricos para el actuador y materiales hiperelásticos para el cuerpo del robot.

Palabras clave: Robot flexible, material hiperelástico, actuadores, piezoeléctrico y sistemas biológicos.

1. Introducción

Las tendencias actuales en el uso de sistemas robóticos en nuestra vida diaria han dado paso al estudio de nuevas estructuras para satisfacer las demandas actuales de la robótica en aplicaciones domésticas e industriales. En los últimos años las aplicaciones de robots flexibles han aumentado por su versatilidad para imitar movimientos biomecánicos, además de su interacción en tareas con humanos como en cirugías no invasivas, rehabilitación y tareas de cooperación en la industria [1], [2]. Además, los robots flexibles son capaces de adaptarse a distintos entornos [3], siendo utilizados en la exploración de ambientes no estructurados como en el caso de búsqueda, rescate y manejo de residuos peligrosos. Los robots flexibles se diseñan con base en material hiperelástico conocido como elastómero, el cual puede deformarse y extenderse al aplicar fuerzas externas de tensión y compresión sin perder sus propiedades elásticas [4]. Por lo tanto, el uso de elastómero como material de diseño permite a los robots flexibles imitar el movimiento de sistemas biológicos como los tentáculos de un pulpo, la trompa de un elefante, el deslizamiento de una serpiente y el nado de un pez [5],[6]. Los robots flexibles se inspiran en el diseño de los mecanismos biológicos y sus sistemas de locomoción como el sistema óseo, el sistema articular y el sistema muscular [7], [8].

Por otra parte, los robots flexibles son accionados con actuadores tradicionales basados en principios neumáticos e hidráulicos, que son inapropiados en robots flexibles a pequeña escala, debido a que generan grandes presiones y deformaciones en las paredes del elastómero provocando su desgaste y ruptura durante la ejecución de sus tareas [5], [9]. El objetivo de este proyecto es analizar los movimientos de desplazamiento, doblez y torsión para la locomoción de un robot flexible

creado con material hiperelástico basado en el accionamiento de actuadores piezoeléctricos mediante simulaciones de elementos finitos en el programa ANSYS.

La estructura del artículo está organizada de la siguiente manera: en la Sección 2 se presenta la propuesta del diseño del actuador piezoeléctrico y del robot flexible, en la Sección 3 se muestran los resultados de las simulaciones y finalmente en la Sección 4 se discuten los resultados y se presentan las conclusiones de este trabajo de investigación.

2. Propuesta y Diseño

A continuación, en esta Sección se presenta la metodología empleada en esta investigación, como se observa en la Figura 1.

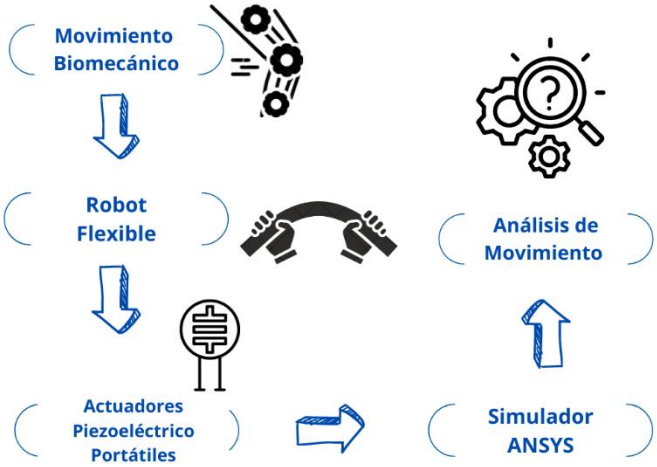


Figura 1. Metodología.

La propuesta de este proyecto nace del concepto de biomecánica como un campo de estudio interdisciplinario que comprende el funcionamiento de los movimientos generados por el cuerpo humano y otros seres vivos, desde una perspectiva mecánica como en el caso de los cefalópodos, los cuales son animales invertebrados, estos logran hazañas de manipulación y locomoción pese a no contar con un esqueleto. Además, su suavidad y flexibilidad corporal busca la simplicidad y refleja una reducida complejidad en sus interacciones con el entorno [1]. En otras palabras, lo biomecánica analiza y describe los movimientos de los organismos vivos como los humanos, animales y plantas, considerando cómo interactúan sus sistemas musculares, óseos y articulares.

La ventaja de los robots flexibles radica en su biomecánica para adaptarse a entornos no estructurados o cambiantes, por lo cual son utilizados en aplicaciones tales como procedimientos médicos, en los cuales pueden navegar de manera segura en el interior del cuerpo humano. Además, son utilizados en la industria en tareas de manipulación de objetos con geometrías variadas, sin producir grandes fuerzas debido a su estructura elástica [10]. Su versatilidad y capacidad de movimiento suave y controlado los hacen idóneos para una amplia variedad de aplicaciones donde la seguridad es primordial, debido a la capacidad de absorción de impactos del material utilizado (elastómero), reduciendo así el riesgo de lesiones por colisiones en comparación con los robots rígidos [11].

En este proyecto se propone el diseño de un robot flexible de 62.83 mm de largo, 30 mm de ancho y 2 mm de espesor. El objetivo es generar movimientos mediante la deformación del elastómero. Para las propiedades del material hiperelástico se utiliza el análisis de elementos finitos no lineales del modelo Yeoh de tercer orden con las siguientes condiciones C10 = 0.57382 MPa, C20 = -7.4744e-2 MPa, C30 = 1.1321e-2 Mpa. Los actuadores piezoeléctricos propuestos son de 3 mm de ancho, 25 mm de largo y 0.5 mm de espesor. Para la simulación de los movimientos del robot flexible, se analizaron arreglos de dos y cuatro actuadores sobre la estructura del robot, aplicando 1.5 volts en cada uno mediante el lenguaje APDL de ANSYS.

El efecto piezoeléctrico es el fenómeno por el cual, al aplicar una fuerza mecánica sobre un material, se genera una carga eléctrica en su estructura. En estado de equilibrio, sin la presencia de estrés externo, las cargas positivas y negativas en cada celda del material están balanceadas, manteniéndolo eléctricamente neutro. Sin embargo, al someter el material a una tensión o presión mecánica, su estructura se deforma, provocando la separación de las cargas positivas y negativas en cada molécula, lo que genera pequeños dipolos. Esta deformación da lugar a un campo eléctrico, el cual puede ser aprovechado para convertir la energía mecánica en energía eléctrica, útil para diversas aplicaciones [12].

La polarización iónica promedio por unidad no existirá en materiales enlazados covalentemente en los que no estén presentes iones. La polarización promedio por unidad de volumen, $\vec{P}$ producida por N pequeños dipolos eléctricos donde todos están alineados, se expresan:

$$\vec{P} = \frac{1}{VOLUMEN} \sum_{k=0} \vec{P}_k \tag{1}$$

Las ecuaciones constitutivas de los materiales piezoeléctricos relacionan las variables mecánicas (esfuerzo y deformación) con las variables eléctricas (campo y desplazamiento eléctrico). Estas ecuaciones pueden expresarse de diferentes maneras, pero la forma más común es la siguiente:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \tag{2}$$

donde ϵ es el vector de deformaciones, este vector tiene seis componentes, correspondientes a las seis posibles deformaciones independientes en un medio tridimensional. Matriz S (matriz de conformidad) que se define como $S = 1/C$ donde la matriz C es la matriz de constantes elásticas y relaciona las deformaciones y los esfuerzos. Esta matriz es simétrica y describe las propiedades elásticas del material. El vector σ representa los esfuerzos normales y cortantes que actúan sobre el material. La matriz d de constantes piezoeléctricas describe cómo los esfuerzos mecánicos σ generan un desplazamiento eléctrico D en el material. Cada coeficiente d de la matriz indica la contribución de una componente específica del esfuerzo a una componente específica del desplazamiento eléctrico. El vector E representa el campo eléctrico aplicado al material y tiene tres componentes correspondientes a las direcciones espaciales E_1, E_2, E_3.

La ecuación constitutiva piezoelectrica es fundamental para el diseño y análisis del dispositivo piezoeléctrico en diferentes condiciones, donde es crucial entender como el material piezoeléctrico se deforma bajo una carga mecánica y campo eléctrico aplicado. Esta puede ser expresada como:

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 40, pp. 567 - 582.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \xi_{13} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \xi_{23} \\ \xi_{31} & \xi_{32} & \xi_{33} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (3).$$

donde D es el vector de desplazamiento eléctrico, ξ es la matriz de permitividad que describe cómo el material responde a un campo eléctrico aplicado E_i generando un desplazamiento eléctrico D_i. Estas ecuaciones son fundamentales, ayudan a entender y diseñar dispositivos piezoeléctricos. Determinando las tensiones mecánicas y los desplazamientos eléctricos del material en relación con la deformación del material o al campo eléctrico al que está expuesto. Las ecuaciones (2) y (3) en forma compacta pueden ser representadas como:

$$\varepsilon_{ij} = S^E_{ijkl}\sigma_{kl} + d_{ijk}E_k \quad (4).$$

$$D_i = d_{ikl}\sigma_{kl} + \xi^T_{ik}E_k \quad (5).$$

ε representa los componentes de deformación, S^E es la matriz de conformidad relacionada con las constantes de elasticidad (m^2/N), σ representa los componentes de esfuerzo o tensión (N/m^2), d son las constantes piezoeléctricas (C/N), E es el campo electromagnético (V/m), D representa el desplazamiento eléctrico (C/m^2) y ξ es la permitividad del material (Fm^{-1}).

El modo d_{31} representa la constante que describe la relación entre los esfuerzos mecánicos aplicados y la respuesta eléctrica generada, como se observa en la Figura 2(a). Por otro lado, en el modo d_{33}, el material piezoeléctrico responde a una deformación en la misma dirección del campo eléctrico aplicado, tal como se ilustra en la Figura 2(b).

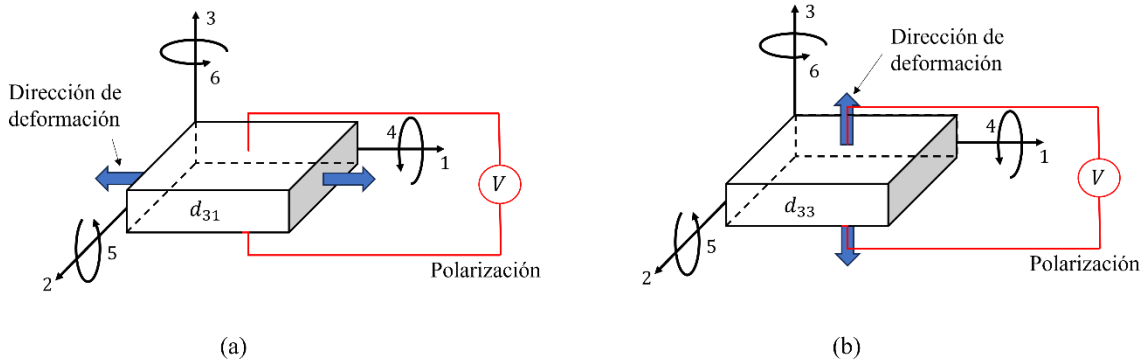


Figura 2. (a) Se aprecia el modo d_{31} donde la deformación ocurre en la dirección perpendicular a la dirección de polarización, (b) muestra el efecto d_{33} donde la deformación ocurre en la dirección de polarización.

El transductor macrofibra (MFC), compuesto por fibras piezocerámicas (PZT), fue desarrollado en 1996 en el Centro de Investigación Langley de la NASA. El MFC es un material de actuación en

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 40, pp. 567 - 582.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

capas y plano que consiste en una sección transversal rectangular con fibras piezocerámicas unidireccionales incrustadas en una matriz de polímero termoestable. La capa activa de fibras reforzadas está entre capas de película de kapton y materiales revestidos de cobre que tienen un patrón de electrodos interdigitados. La geometría del MFC es uniforme, incluyendo la separación y continuidad de las fibras PZT y los electrodos. El propósito de las fibras rectangulares es mejorar el contacto entre la piezocerámica y el electrodo adyacente para asegurar una transferencia más eficiente del campo eléctrico. Los actuadores y sensores MFC utilizados en este artículo eran dispositivos de tipo P1, operando de acuerdo con el mecanismo de acoplamiento electromecánico d_{33}, donde "d" es la polarización generada por unidad de estrés mecánico (T) aplicado a un material piezoeléctrico.

- Mecanismo d_{31}: La polarización inducida está en la dirección 3 y el estrés se aplica en la dirección 1 (Fig. 2(a)).
- Mecanismo d_{33}: La polarización inducida y el estrés aplicado están en la dirección 3 (Fig. 2(b)).

Ahora se describen las condiciones, diseño y características de la propuesta para el actuador piezoeléctrico. Se eligió el tipo MFC 2503-P1 (ver Fig. 3) con efecto d_{33} (3 mm de ancho, 25 mm de largo y 0.5 mm de espesor) debido a su mayor rango de voltaje operativo de -500V a +1500V, a diferencia del tipo P2, que tiene un rango de -60V a 360V. Este rango más amplio permite una mayor flexibilidad en aplicaciones de campo. Las propiedades mecánicas y eléctricas se enumeran en la Tabla 1.

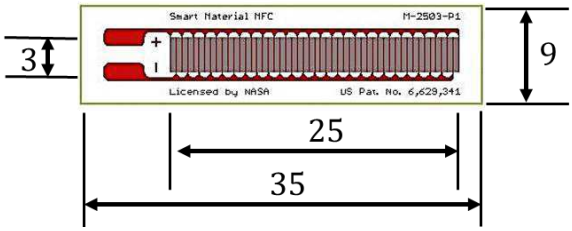


Figura 3. Dimensiones del actuador MFC.

Tabla 1. Propiedades mecánicas y eléctricas del MFC 2814-P1 utilizadas en el análisis numérico (Collet et al., 2011).

Coeficientes de rigidez mecánica:

C_{11}^E=39.4 GPa	C_{22}^E=20.3 GPa
C_{33}^E=32.5 GPa	C_{12}^E=12.9 GPa
C_{13}^E=8.3 GPa	C_{23}^E=5.3 GPa
C_{44}^E=5.5 GPa	C_{55}^E=5.5 GPa
C_{66}^E=13.1 GPa	

Coeficientes de acoplamiento de tensión piezoeléctrica:

e_{31}=13.62 cm^2	e_{33}=-4.1 cm^2
e_{32}=0.55 cm^2	e_{24}=-17.03 cm^2
e_{15}=-17.03cm^2	

Coeficientes de permitividad a tensión constante:

ϵ_{11}=141.2ϵ_0C V^{-1} m^{-1}	ϵ_{22}= 141.2 ϵ_0 C V^{-1} m^{-1}

ϵ_{33}=141.2ϵ_0C V^{-1} m^{-1}	

Uno de los principales retos de los enfoques analíticos tradicionales para modelar materiales piezoeléctricos es su limitación a geometrías y propiedades simples, como las de los cerámicos PZT convencionales. Aunque son útiles, estos enfoques no son adecuados para modelar transductores de mayor complejidad.

El Método de Elementos Finitos (FEM) se presenta como una solución efectiva a las limitaciones de los enfoques analíticos tradicionales, ofreciendo una mayor flexibilidad en la representación de geometrías complejas y diversas propiedades de los materiales. A diferencia de los modelos analíticos, el FEM permite modelar transductores más complejos al discretizar el dominio del problema en una malla de elementos finitos, aproximando la solución de manera numérica. A través del método de trabajo virtual, se obtiene un sistema de ecuaciones de movimiento para cada elemento del modelo.

En términos generales, el proceso de FEM se puede describir mediante tres fases principales: preprocesamiento, solución y posprocesamiento. En la Figura 4 se ilustra este esquema, detallando los componentes clave de cada etapa. El preprocesamiento involucra la creación del modelo geométrico y la definición de las propiedades del material. La fase de solución se centra en resolver las ecuaciones generadas para cada elemento de la malla. Finalmente, el posprocesamiento permite interpretar los resultados mediante visualización y análisis de los datos obtenidos, lo cual ha sido esencial en el desarrollo de este trabajo.

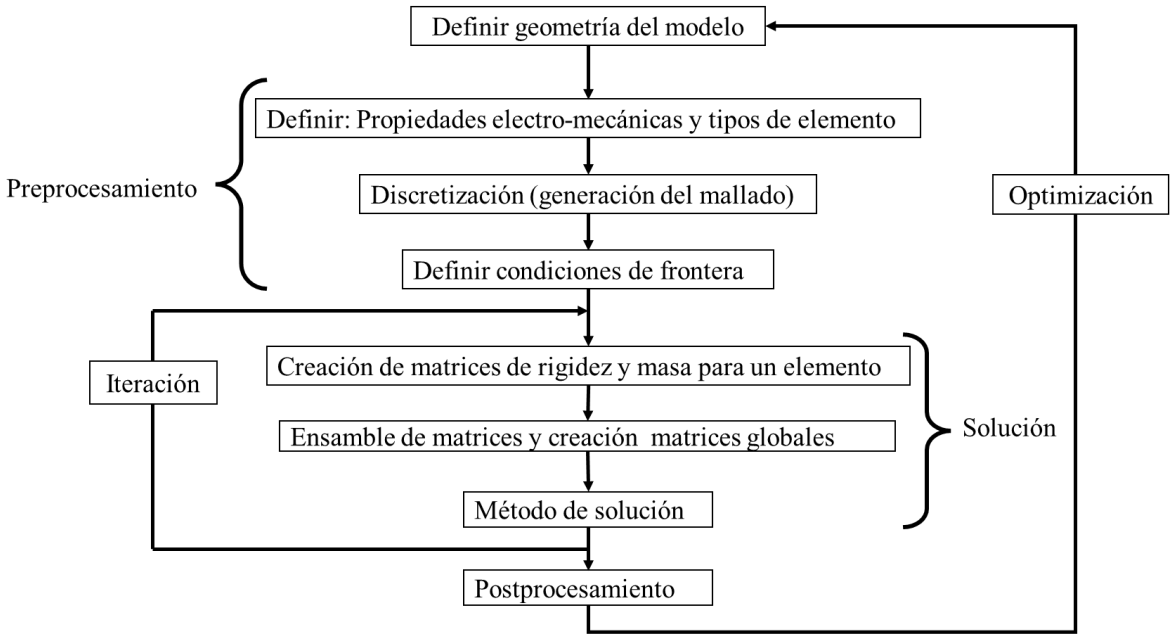


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de análisis por el método de elementos finitos.

Como parte del preprocesamiento, para asegurar la continuidad de desplazamientos y tensiones, la interacción entre el MFC y la placa se modeló como una condición de unión perfecta, debido a la interacción de dos materiales (MFC y el elastómero). La discretización se realizó utilizando 2 elementos a través del espesor con el elemento unitario SOLID186 de comportamiento de desplazamiento cuadrático. Este elemento está definido por 20 nodos con tres grados de libertad por nodo (ux, uy, uz). Para modelar el material piezoeléctrico se usó el elemento SOLID5. Se utilizaron elementos CONTA174 para modelar la condición de unión entre el MFC y la placa usando la configuración ("siempre unido"). Se utilizaron elementos de contacto según se define en FEM.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 40, pp. 567 - 582.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Con estas dimensiones se propuso un arreglo de 2 y 4 piezoeléctricos para un primer análisis de movimiento ubicados estratégicamente sobre cada esquina del cuerpo flexible para simular su actuación en ANSYS. El mallado con el que se analizó el actuador piezoeléctrico es hexaédrico con 300 elementos como se muestra en la Figura 5.

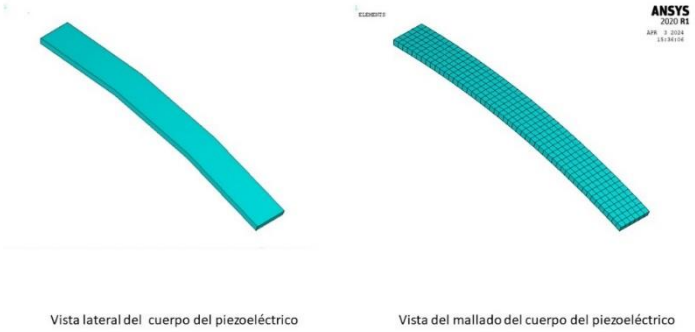


Figura 5. Geometría del cuerpo del actuador piezoeléctrico.

En la Figura 6 se observa una prueba preliminar de aplicar el actuador piezoeléctrico con un voltaje de 1.5 v, donde se observa la deformación del material que genera un cambio en el desplazamiento del cuerpo del actuador.

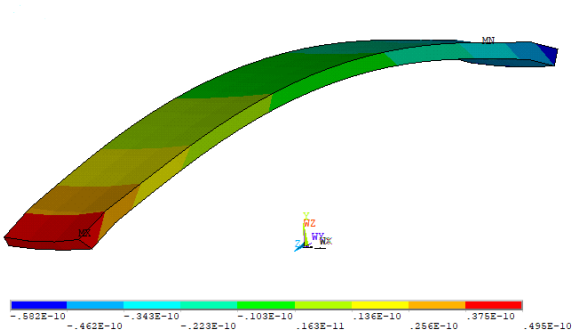


Figura 6. Simulación del actuador piezoeléctrico cuando se le aplica voltaje para su deformación.

Tabla 2. Propiedades del elastómero.

Material Propiedades		
Propiedad	Valor	Unidad
3er Orden		
Material constante C10	0.53782	Mpa
Material constante C20	-0.074744	Mpa
Material constante C30	0.011321	Mpa

Las propiedades del elastómero utilizadas para el análisis y simulación se pueden apreciar en la Tabla 2. Para las propiedades del material hiperelástico se utiliza el análisis de elementos finitos no lineales del modelo Yeoh de tercer orden.

En la Figura 7 se muestra la ilustración de la geometría del cuerpo del robot flexible. Las dimensiones utilizadas para su diseño son de 30 mm de ancho, 62.832 mm de largo y 2 mm de espesor. Los 4 piezoeléctricos para un primer análisis de movimiento ubicados estratégicamente en la geometría del robot en cada una de las esquinas sobre el cuerpo del robot flexible. El mallado con el que se analizó el robot flexible es hexaédrico con 1752 elementos del elastómero, piezoeléctrico y de contacto.

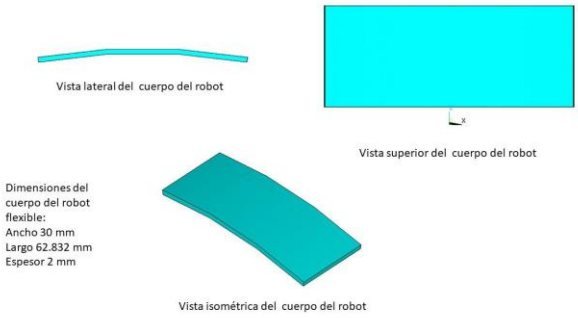


Figura 7. Geometría del cuerpo del robot flexible.

3. Resultados y Discusión

Para el análisis y simulación del robot flexible accionado por piezoeléctricos, se utilizó la versión educativa del software de simulación de ingeniería y ciencia Ansys. Esta plataforma altamente especializada permite realizar análisis numéricos y simulaciones de fenómenos físicos en una variedad de campos, basándose en métodos matemáticos y computacionales para modelar el comportamiento de sistemas físicos complejos.

En particular, se utilizó ANSYS Mechanical APDL, una herramienta que permite realizar análisis térmicos, estructurales, acústicos, piezoeléctricos, electrostáticos y electromagnéticos, acoplados incluso a circuitos eléctricos. El lenguaje Paramétrico Ansys APDL, con su interfaz de línea de comandos, facilita la definición y ejecución de simulaciones avanzadas. Esto resulta útil para diseñar geometrías específicas del robot flexible, ajustando los valores asignados para las dimensiones del elastómero y el piezoeléctrico, elementos clave en su construcción y funcionamiento.

El proceso de modelado numérico con FEM en APDL se muestra a continuación siguiendo las etapas del diagrama en la Figura 4: preproceso, solución y postproceso.

Preproceso:

1. **Definición de tipo de elementos**:
    - **SOLID186**: Elemento 3D de 20 nodos adecuado para modelado no lineal y grandes deformaciones, ideal para materiales hiperelásticos como el elastómero.
    - **SOLID5**: Elemento de 8 nodos para modelar materiales piezoeléctricos en 3D, con capacidades estructurales y eléctricas.
2. **Definición de propiedades de los materiales**:
    - **Elastómero**:

- Matriz de elasticidad: Comportamiento elástico no lineal.
- Densidad: Masa por unidad de volumen.

- **Piezoeléctrico**:
  - Matriz de elasticidad, de permitividad y piezoeléctrica: Relacionan el campo eléctrico con la deformación mecánica y las propiedades elásticas.
  - Densidad: Masa por unidad de volumen.

3. **Creación de geometría paramétrica**: Permite ajustar el diseño fácilmente modificando parámetros clave como las dimensiones del robot flexible.
4. **Definición de parámetros de mallado**: Tamaño de elementos y selección del tipo adecuado para cada material y región.
5. **Definición de contactos**: Uso de **CONTA175** para modelar el comportamiento entre superficies en contacto, como entre el elastómero y el piezoeléctrico.
6. **Aplicación de señal de voltaje**: Definir y cargar la señal de voltaje que se aplicará al piezoeléctrico durante la simulación.

Solución:

1. **Aplicación de condiciones de frontera**:
   - Fijaciones: Restringir grados de libertad en nodos específicos.
   - Voltaje: Aplicar la señal definida en las superficies del material piezoeléctrico.
2. **Parámetros de solución transitoria**:
   - Duración de simulación, incrementos de tiempo y habilitación de grandes desplazamientos para capturar el comportamiento dinámico.

Postproceso:

1. **Visualización de resultados**: Generar gráficos de contorno para visualizar tensiones, deformaciones y potencial eléctrico.
2. **Análisis detallado**: Extraer curvas de nodos específicos para estudiar el comportamiento en áreas críticas.

La Tabla 3 compara las dimensiones de dos componentes clave en sistemas de robots flexibles: el material piezoeléctrico y el elastómero. El piezoeléctrico, con un ancho de 3 mm y un espesor de 0.5 mm, es significativamente más delgado y estrecho que el elastómero, que presenta un ancho de 30 mm y un espesor de 2 mm. Estas diferencias dimensionales sugieren que el piezoeléctrico está optimizado para aplicaciones de alta precisión y pequeña escala, mientras que el elastómero, con su estructura más robusta, es ideal para funciones que requieren mayor flexibilidad y soporte estructural.

En cuanto a la longitud, el piezoeléctrico mide 25 mm, mucho menos que los 62.832 mm del elastómero, lo que indica que este último está diseñado para abarcar áreas más amplias o para proporcionar una mayor superficie de contacto. A pesar de su pequeño radio interno de 0.06 mm, este detalle puede ser esencial para garantizar la precisión en los ajustes o conexiones entre ambos materiales. En conjunto, estas dimensiones muestran cómo cada material cumple un rol específico dentro del sistema robótico flexible, aprovechando sus propiedades geométricas y físicas para mejorar el rendimiento del robot.

Tabla 3. Valores precisos de la geometría del robot flexible.

Medidas del elastómero (robot flexible) y piezoeléctrico.	
Ancho Piezoeléctrico	3 mm
Ancho Elastómero	30 mm
Espesor Piezoeléctrico	0.5 mm
Espesor Elastómero	2 mm
Radio Interno	0.06 mm
Largo Elastómero	62.832 mm
Largo del piezoeléctrico	25 mm

Se hizo un análisis avanzado de materiales, incluyendo el material hiperelástico en una estructura no lineal, donde se obtuvieron deformaciones, del robot flexible propuesto en la Figura 8. Se definieron los elementos, el elastómero y el parche piezoeléctrico.

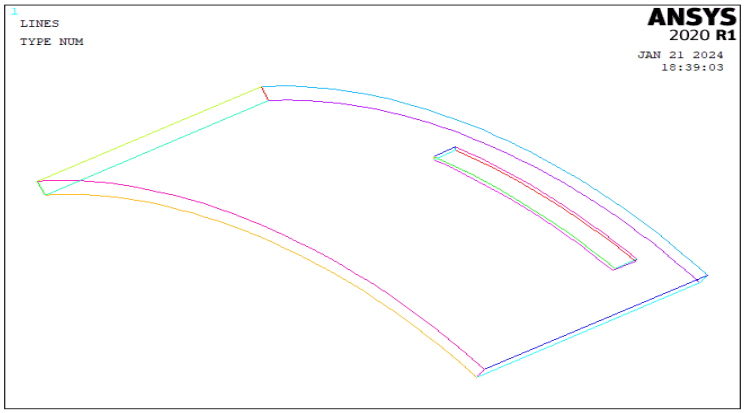


Figura 8. Robot flexible, áreas, volúmenes y un actuador piezoeléctrico en la parte superior.

Se establecieron contactos que tendrán el elastómero con los cuatro actuadores piezoeléctrico en el área del robot flexible, como se aprecia en la Figura 9.

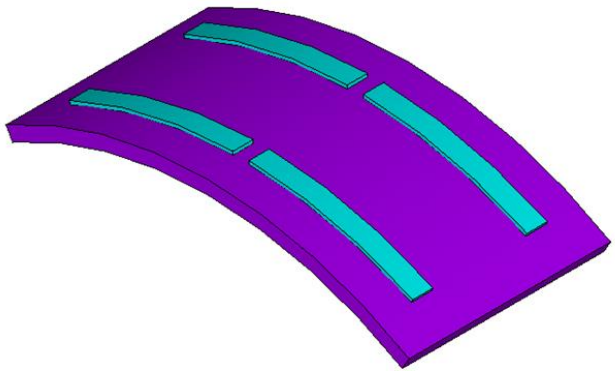


Figura 9. Ensamble de los actuadores piezoeléctricos en la parte superior del robot flexible (elastómero).

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 40, pp. 567 - 582.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Se procedió al mallado del piezoeléctrico Figura 10. De igual manera el del robot flexible, fue analizado por los elementos finitos (FEM) donde se definió el tamaño del elemento, en este caso de 0.4 mm.

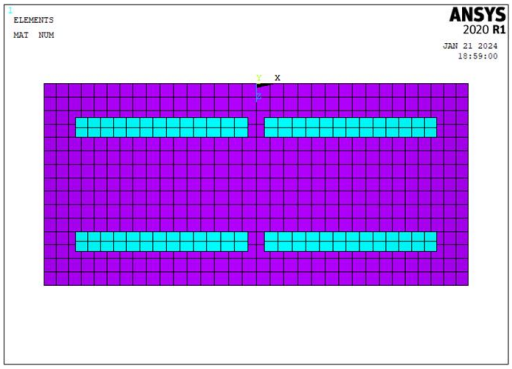


Figura 10. Mallado por elemento finito (división del cuerpo del robot flexible y actuadores piezoeléctricos).

Para el modelado del sistema, se definieron los materiales, propiedades y zonas de contacto, estableciéndose las condiciones de frontera para la aplicación del voltaje en los piezoeléctricos. El electrodo se ubicó en la zona de contacto con el elastómero, donde se asumió un voltaje de 0 v, mientras que en la superficie superior del piezoeléctrico se aplicó un voltaje diferente de 0. Los extremos del elastómero se fijaron para restringir su movimiento, lo que permitió observar como la diferencia de potencial generaba deformaciones controladas en el elastómero. En la Figura 11 se ilustra como estas condiciones generan la deformación deseada en el elastómero al aplicar la diferencia de potencial.

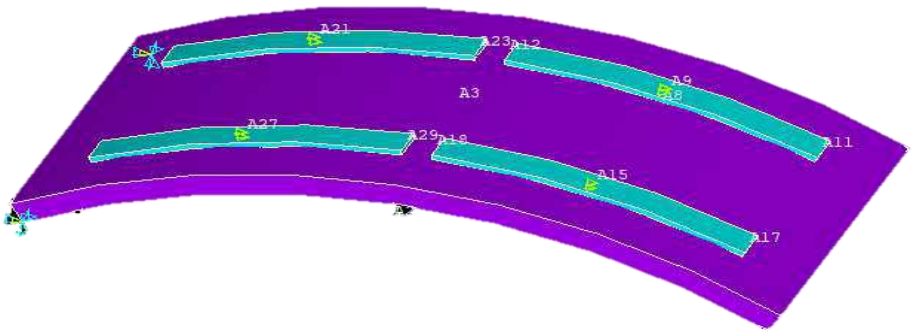
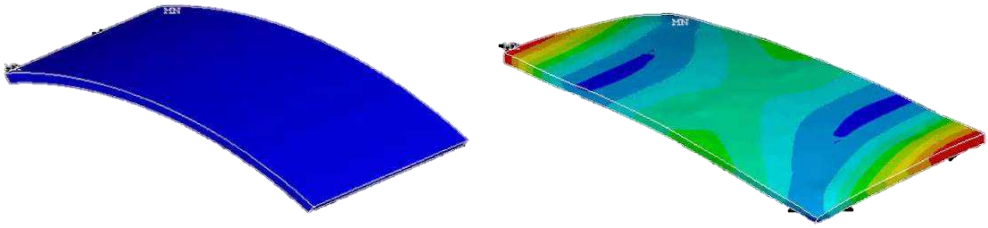


Figura 11. Condiciones de frontera.

En la Figura 12 se muestra el resultado del efecto en el elastómero en dos estados. En (a), se muestra el elastómero en su condición inicial sin deformación, es decir, antes de la aplicación de voltaje. En (b), se observa el elastómero deformado como resultado de la aplicación de voltaje al material piezoeléctrico flexible acoplado, lo que genera una deformación mecánica inducida por la interacción eléctrica y mecánica en el sistema.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 40, pp. 567 - 582.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.



(a) (b)

Figura 12. (a) Elastómero en su condición inicial, (b) elastómero deformado al aplicar voltaje al MFC adherido.

En la Figura 13 tenemos la solución representada como contornos que ayudan a interpretar los resultados, en este caso se muestran resultados de la resultante de desplazamiento desde el mínimo (cero) que está representado con contornos en color azul y el rojo siendo su desplazamiento máximo. El resultado muestra que la mayor deformación se da en la parte central del elastómero y son desplazamientos en la dirección Z, lo que se interpreta como movimiento de contracción de los extremos del elastómero.

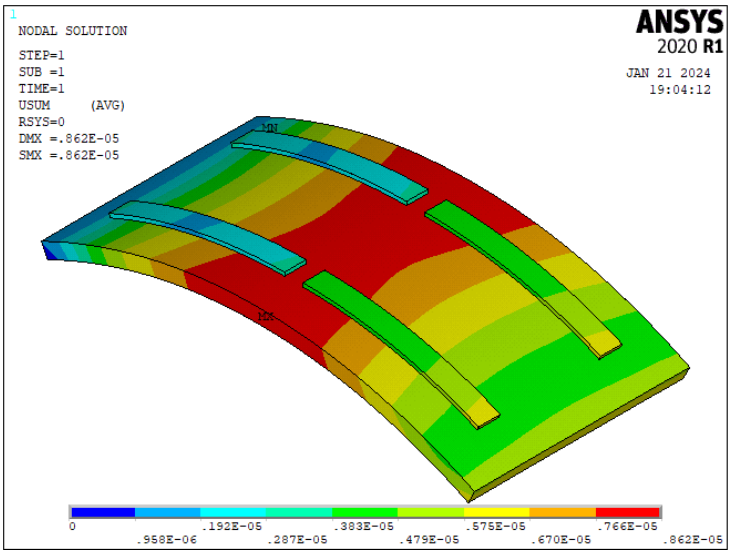


Figura 13. Desplazamientos mínimos y máximos.

En la siguiente Figura 14 podemos observar los nodos en la sección del elastómero. Para este análisis, se seleccionaron específicamente los nodos en la sección transversal del elastómero, enfocándose en la cara exterior. Al analizar estos nodos en relación con el arco del elastómero, se puede visualizar cómo se distribuyen los desplazamientos a lo largo de la geometría curvada, proporcionando una comprensión detallada del comportamiento del material bajo la influencia de las señales de voltaje aplicadas. Esta selección y análisis permiten una interpretación precisa de los efectos de la activación en la deformación del elastómero.

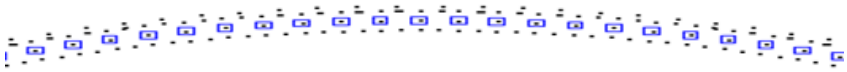


Figura 14. Selección de nodos para graficar desplazamientos.

En los resultados del análisis se presenta la suma de los desplazamientos experimentados por los nodos distribuidos en el robot flexible, lo que permite visualizar cómo cada punto del robot se ha movido o deformado bajo las condiciones del estudio. La Figura 15 muestra un desplazamiento máximo en el centro de la cara superior del robot cuando se aplica un voltaje de 1.5 V. El análisis a lo largo de una línea central en esta misma cara revela que el mayor desplazamiento ocurre en la zona central, donde los cuatro piezoeléctricos, al aplicar el voltaje, inducen una deformación significativa, demostrando la eficiencia del sistema para generar movimiento controlado en el robot.

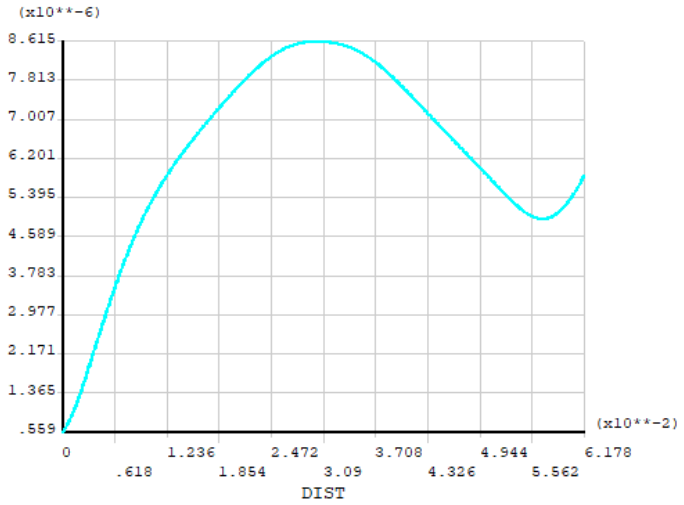


Figura 15. Resultado de desplazamientos y análisis de los nodos en la vista frontal.

En la Figura 16 se muestra la secuencia del video del movimiento del robot. El robot flexible se mueve en un tiempo de un segundo, variando a su movimiento o desplazamiento y regresando a su posición inicial donde en las esquinas de atrás se restringe el voltaje al utilizar la configuración de cuatro actuadores piezoeléctricos. Estas muestran cómo el elastómero se deforma de manera sincronizada en respuesta a las señales de voltaje en fase aplicadas a los MFCs en diferentes momentos. La variación de colores representa el nivel de deformación, donde el azul índica menor deformación y el rojo indica mayor deformación. Esta visualización permite entender cómo las señales de voltaje en fase influyen en la deformación del elastómero a lo largo del tiempo, crucial para aplicaciones en las que se necesita un control preciso del movimiento, como en los actuadores piezoeléctricos.

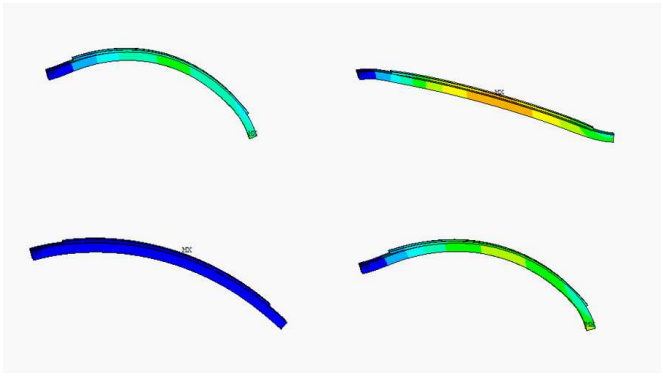


Figura 16. Secuencia de movimiento del robot flexible.

En la Figura 17 el robot flexible tiene un tiempo de un segundo, ejerce un movimiento de doblez y de torsión que simula un movimiento de locomoción, aplicando un voltaje con una configuración de dos actuadores piezoeléctricos manteniendo restricción de cero voltajes en uno mientras se aplica voltaje en el otro.

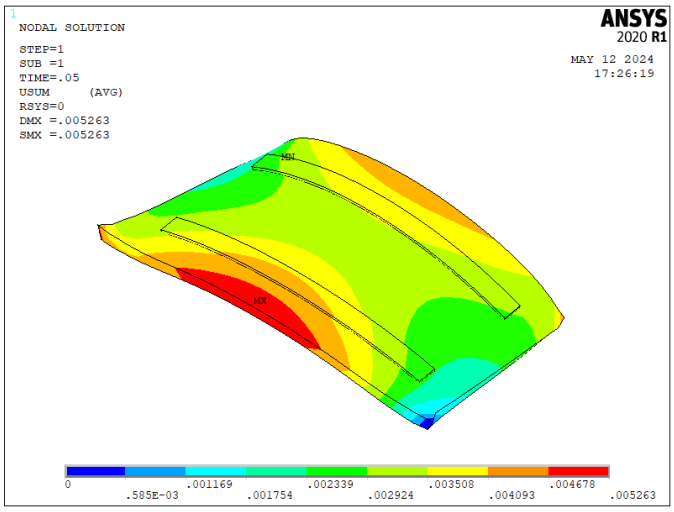


Figura 17. Resultado del movimiento del robot flexible.

Las Figura 18 se muestran los resultados transitorios del modelo para una activación secuencial senoidal de dos MFCs y el efecto que tienen en un elastómero. Las cuatro subfiguras representan diferentes instantes de tiempo, utilizando un esquema de colores para ilustrar el desplazamiento y la deformación del elastómero, donde los colores van del azul (mínimo desplazamiento) al rojo (máximo desplazamiento). La señal de entrada es una señal senoidal aplicada de forma desfasada en los MFCs, lo que genera un efecto de deformación progresiva. Este enfoque permite que el robot suave simule un movimiento de caminata, mostrando cómo las señales senoidales secuenciales y desfasadas producen deformaciones complejas en el elastómero, cruciales para el diseño y funcionamiento de actuadores y sensores piezoeléctricos en aplicaciones robóticas.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 40, pp. 567 - 582.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

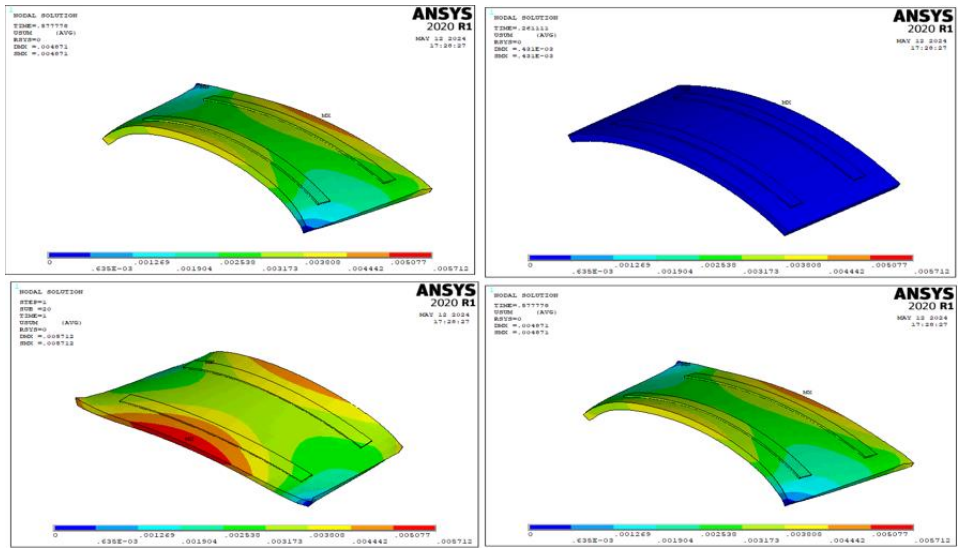


Figura 18. Simulación del movimiento de caminata del robot flexible.

4. Conclusiones

El enfoque de esta investigación se centra en el uso de actuadores de materiales piezoeléctricos como una alternativa a la portabilidad y bajo consumo de energía para aplicaciones en robótica flexible a pequeña escala. El cual se validó con análisis de elementos finitos utilizando la teoría de materiales piezoeléctricos para el diseño del actuador y materiales hiperelásticos en el cuerpo del robot flexible. Se presentó el diseño de un robot a pequeña escala con dimensiones de 62.83 mm de largo, 30 mm de ancho y con un espesor de 2 mm, lo anterior para generar movimientos mediante la deformación del elastómero, utilizando las propiedades del material hiperelástico se utiliza el análisis de elementos finitos no lineales del modelo Yeoh de tercer orden. Se presentó el diseño de un actuador piezoeléctrico con las dimensiones de 3 mm de ancho, 25 mm de largo y 0.5 mm de espesor, con lo que se selecciona un arreglo de cuatro y dos piezoeléctricos en la parte superior del robot flexible y en las esquinas para probar distintas configuraciones de activación de 1.5 V en cada uno de ellos. Para la primera simulación, con la configuración de cuatro piezoeléctricos en las esquinas, se aprecia claramente un mayor desplazamiento en la zona central de la cara frontal y lateral del robot flexible al aplicar 1.5 V de entrada. Para la segunda simulación, con la configuración de dos actuadores piezoeléctricos, se muestran los resultados transitorios del modelo de Elementos Finitos (FEM) para una activación secuencial senoidal de dos MFCs para demostrar el desplazamiento y la deformación del elastómero, lo que genera un efecto de deformación progresiva. Este enfoque permite que el robot suave simule un movimiento de avance crucial para el diseño y funcionamiento de actuadores y sensores piezoeléctricos en aplicaciones robóticas.

Como trabajo a futuro se propone construir el prototipo del robot flexible en físico, realizando el diseño del molde para el vaciado del elastómero utilizando impresión 3D en material de resina. Además, utilizar una bomba de vacío para evitar formación de burbujas en las paredes del robot creadas por el elastómero. Además, se plantea realizar pruebas con diferentes configuraciones de activación, con dos y cuatro actuadores piezoeléctricos en la estructura del robot.

Bibliografía

Rus, D., & Tolley, M. T. (2015). Design, fabrication and control of soft robots. In Nature (Vol. 521, Issue 7553, pp. 467–475). Nature Publishing Group. https://doi.org/10.1038/nature14543

Schmitt, F., Piccin, O., Barbé, L., & Bayle, B. (2018). Soft robots manufacturing: A review. In Frontiers Robotics AI (Vol. 5, Issue JUN). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00084

Lee, C., Kim, M., Kim, Y. J., Hong, N., Ryu, S., Kim, H. J., & Kim, S. (2017). Soft robot review. In International Journal of Control, Automation and Systems (Vol. 15, Issue 1, pp. 3–15). Institute of Control, Robotics and Systems. https://doi.org/10.1007/s12555-016-0462-3

Chen, Y., Zhao, H., Mao, J., Chirarattananon, P., Helbling, E. F., Hyun, N. seung P., Clarke, D. R., & Wood, R. J. (2019). Controlled flight of a microrobot powered by soft artificial muscles. Nature, 575(7782), 324–329. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1737-7

Medina, J. H., & Vélez, P. N. (2014). “Soft Robotic”: Una nueva generación de robots (Vol. 109).

Pataranutaporn, P., De La Vega, J. S., Chowdhury, A., Ng, A., & Mihaleva, G. (2018, August). Toward growable robot: Exploring and integrating flexible–Biological matter with electronics. In 2018 International Flexible Electronics Technology Conference (IFETC) (pp. 1-4). IEEE.

Pal, A., Restrepo, V., Goswami, D., & Martinez, R. V. (2021). Exploiting mechanical instabilities in soft robotics: control, sensing, and actuation. Advanced Materials, 33(19), 2006939.

Shankar, N. V. S., Kamma, T., Krishna, B. M., Kumar, C. H., & Shalem, B. (2021). Smart Actuators: A Review. In Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (pp. 2226-2238).

Wang, J. L., Song, J. L., Liu, A. R., Liang, J. Q., Zhou, F. B., Liang, J. J., ... & Chen, B. C. (2024). Design and architecture of a slender and flexible underwater robot. Intelligent Service Robotics, 1-20.

Duchaine, V., Lauzier, N., Baril, M., Lacasse, M. A., & Gosselin, C. (2009, May). A flexible robot skin for safe physical human robot interaction. In 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (pp. 3676-3681). IEEE.

Dahiya, R. S., Adami, A., Pinna, L., Collini, C., Valle, M., & Lorenzelli, L. (2014). Tactile sensing chips with POSFET array and integrated interface electronics. IEEE Sensors Journal, 14(10), 3448-3457.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 41, pp. 583 - 593.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Reingeniería de un Robot Industrial de Seis Grados de Libertad para su Aplicación en el Proceso GMAW

Jiménez Navarro Omar Alejandro [1], Gutiérrez Alvarado Fernanda Guadalupe [1], Gómez Casas Josué [1], Silva de León Marco Antonio [1], Hernández Flores Jorge Eduardo [1,2], Galindo Valdés Jesús Salvador[1] y Muñiz Valdez Carlos Rodrigo [1]

[1]Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Coahuila.
[2]InnovaBienestar de México
*J. Gómez Casas: jogomezc@uadec.edu.mx.

Resumen

Los sistemas robóticos en la actualidad han extendido sus aplicaciones a actividades de manufactura, logística, hospitalidad, asistencia médica, transporte, construcción, entre otras. Sin embargo, hoy en día se requieren de altas demandas tecnológicas en procesos industriales centradas en sistemas de manufactura inteligentes, por lo que, con el paso del tiempo los robots se vuelven obsoletos por la falta de actualización y soporte técnico en sus sistemas de control y la presencia de fallas mecánicas. La reingeniería de este tipo de robots sirve como una alternativa desde el punto de vista técnico, económico y sustentable. La propuesta de este trabajo se basa en la reingeniería de un brazo robótico industrial de seis grados de libertad para su adaptación en el proceso GMAW y ser empleado para la unión de placas de acero AISI 1018. Lo anterior, con el objetivo de promover el aprendizaje en los diferentes procesos de manufactura dentro de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Coahuila, además, fortalecer las líneas de investigación referentes a las tecnologías de unión. Para analizar la calidad de las uniones realizadas por el robot industrial adaptado para el proceso GMAW, se hará un análisis macroestructural de las uniones.

Palabras clave: robot industrial, reingeniería, reutilización, institución académica, proceso GMAW.

1. Introducción

De acuerdo con las últimas estadísticas publicadas en el año 2022, en el resumen ejecutivo de la Federación Internacional de Robótica (IFR, por sus siglas en ingles), se reporta un nuevo récord a nivel mundial de robots instalados con 553,052 unidades. Las ventas de la industria de servicios de robots actualmente se centran en servicios de transporte y logística, hospitalidad, interfaces médicas, agricultura, limpieza profesional, rescate, seguridad y construcción, algunas referencias de lo anterior son [4, 16]. En la actualidad la incorporación del cuidado sostenible del medio ambiente en robótica se ha vuelto un tema de discusión prominente a nivel mundial. Las nuevas generaciones de robots extienden sus aplicaciones en reciclado de material, reducción de desechos y ahorro de energía [5].

Por otra parte, con el paso de tiempo los robots se vuelven obsoletos y carecen de soporte técnico en las actualizaciones de sus bibliotecas y mantenimiento de sus componentes mecánicos, dejándolos fueras de procesos productivos dentro de la industria. De acuerdo con [2], la importancia de aplicar el concepto de las 6R (rediseñar, reutilizar, remanufacturar, recuperar, reciclar y reducir) promueve la fabricación sostenible de proceso en la industria a través de un procedimiento de reconfiguración de robots, con el fin de ser nuevamente insertados en procesos de automatización. Es importante señalar por ejemplo que en el caso de las pequeñas y medianas empresas (PYMEs) sus principales desafíos para la incorporación de robots industriales son la flexibilidad (versatilidad en sus aplicaciones) y el costo del robot [9]. En el caso específico de las PYMEs su capacidad de producción reduce el número de tareas repetitivas que un robot puede realizar [8].

En consecuencia, el concepto de las 6R permite la inserción de un robot en nuevas tareas, aumentando el tiempo de su vida útil y reduciendo los costos unitarios de producción siendo una alternativa prominente para las PYMEs [15]. De acuerdo con [6] la vida útil promedio de un robot es de 6 a 7 años debido a que su tecnología se vuelve obsoleta e incompatible con las técnicas actuales de automatización. Sin embargo, la mecánica del robot dura entre 10 y 20 años para procesos industriales y en el caso de los robots educativos y de investigación mantiene un tiempo de vida de 5 a 7 años.

Un segundo uso de los robots después de su propósito inicial es una forma rentable y sostenible de maximizar la tecnología robótica. Esto ayuda a reducir la cantidad de residuos electrónicos y fomenta prácticas más respetuosas con el medio ambiente. Además, la reingeniería permite la reutilización de robots como una opción ventajosa desde el punto de vista económico y técnico, ver el ejemplo de [6]. El mantenimiento de sus componentes mecánicos y actualizaciones de software se convierte en una alternativa para mejorar la mecatrónica de alta tecnología en el caso de los robots industriales. La reingeniería de robots universales tiene un gran potencial para ser reinsertados en procesos productivos, ya que más de 80,000 robots se incorporan al mercado secundario cada año, listos para ser actualizados para distintos usos [6].

Una segunda oportunidad de uso de los robots desinstalados y/o desestimados por la industria, brindan la oportunidad de ser reutilizados por instituciones educativos [10]. Es decir, mediante la recuperación de sus componentes electrónicos y mecánicos a través de una reingeniería pertinente los robots industriales son reutilizables y permitirían su aprovechamiento de estos, en actividades académicas dentro de los centros de educación profesional como universidades [3]. Los robots pueden ser insertados en actividades académicas mediante prácticas de laboratorio y capacitación de alumnos mediante la reintegración de la robótica en procesos de ingeniería [17].

El objetivo general de este proyecto es reutilizar un robot industrial de seis grados de libertad (recibido como donación de una empresa de la región) con fallas mecánicas-eléctricas para la integración de un proceso de soldadura tipo GMAW en placas de acero 1018, lo anterior para ser utilizado en prácticas de laboratorio y capacitación de alumnos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Coahuila. Con la propuesta de este proyecto se logra beneficiar a los alumnos de nuestros programas educativos de Ingeniero Mecánico Eléctrico e Ingeniero Mecánico Administrador mediante prácticas de laboratorio en las asignaturas cono automatización, instalaciones eléctricas, maquinas eléctricas, ingeniería de control, procesos de fabricación entre otras. Además, con la implementación de este proyecto se fortalecen los proyectos de tesis en líneas de investigación como la de procesos de fabricación, manufactura, automatización, robótica y control para alumnos de licenciatura de nuestros programas educativos y de la Maestría en Ingeniería Mecánica con Acentuación de Materiales. Por último, cabe señalar que con este proyecto también se impacta en la formación y fortalecimientos para los módulos del diplomado en robótica industrial.

El uso de robots industriales se ha incrementado en procesos de manufactura donde es necesario un control de parámetros con el fin de aumentar la repetibilidad, y con ello, disminuir los defectos por errores humanos. Un robot industrial puede ser empleado para distintos procesos de fabricación, siendo el más común en la industria metal-mecánica, los utilizados para la soldadura. Uno de los procesos de soldadura convencionales mayormente empleados en la industria, es el proceso soldadura por arco eléctrico con protección gaseosa (GMAW, por sus siglas en inglés). Se trata de una tecnología de unión que permite la alimentación de un electrodo consumible empleando una atmósfera con gas inerte, activo o mezcla de ambos para proteger el charco de soldadura [12]. Es un proceso versátil, ya que, por sus características se pueden realizar uniones en todas las posiciones, además, es empleado para soldar aleaciones base hierro como acero al carbono entre ellos el AISI 1018, inoxidable, de baja aleación e incluso materiales no ferrosos; permite soldar materiales con espesores desde 3 hasta 25 mm, esto último a través de multipasos ofreciendo una adecuada calidad y alta velocidad de aplicación de soldadura [14, 11]. Además, permite la variación entre distintos tipos de transferencia del metal de aporte que van alternando mediante la modificación de parámetros de operación. Esto último toma relevancia, ya que de ellos dependen las características microestructurales y mecánicas resultantes de la unión soldada.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 41, pp. 583 - 593.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Es importante enfatizar, que la región sureste del estado de Coahuila cuenta una gran cantidad de plantas dedicadas a la creación, producción y transformación de productos para la industria automotriz es relevante que los alumnos de ingeniería cuenten con las herramientas teóricas y prácticas en la implementación sistemas de manufactura inteligentes y robotizados para generar una mayor competitividad laboral hoy en día [7]. En la actualidad existe una alta demanda de egresados de ingeniería en la región, sin embargo, requieren de herramientas tecnológicas en áreas de la automatización, manufactura, control, inteligencia artificial, visión por computadora, mediante prácticas en operaciones de celdas de manufactura, donde nuestros estudiantes tengan un acercamiento con estas actividades previo a su ingreso a la vida laboral [13, 1]. Por tal motivo, es de relevancia aplicar reingeniería en procesos de robótica.

La estructura de este trabajo es la siguiente: la sección 2 presenta la metodología utilizada para esta investigación, la sección 3 describe la configuración experimental de las conexiones del robot y el proceso de soldadura, la sección 4 muestra los resultados y finalmente la sección 5 resume las conclusiones de este trabajo.

2. Materiales y métodos.

Con el propósito de alcanzar los objetivos de realizar la reingeniería de un robot industrial de seis grados de libertad para aplicaciones de soldadura se llevaron a cabo seis pasos como se puede observar en la Figura 1.

Figura 1: Metodología utilizada para la reingeniería de un robot industrial en proceso de soldadura. GMAW.

2.1. Reingeniería del Brazo Robótico

La Figura 2 presenta el brazo robótico antes de su instalación en el laboratorio de procesos. En primer lugar, se realizó la revisión y funcionamiento de componentes del robot. Una vez garantizado el funcionamiento de los componentes eléctricos y mecánicos del robot se procedió a realizar la cimentación para su instalación en laboratorio. Para después realizar la instalación de

componentes adicionales, conexiones y cableado eléctrico necesario para energizar el robot. Además, se llevó a cabo un mantenimiento preventivo y correctivo para asegurar que el robot operara de manera segura, incluyendo tareas como limpieza y restauración de la pintura para mantener su estética.

Figura 2: Robot industrial Fanuc R-2000iA/210F de seis grados de libertad, antes de la instalación en el laboratorio de procesos.

Una vez completada la fase de instalación y mantenimiento, se procedió a adaptar el equipo de soldadura al brazo robótico para realizar pruebas exhaustivas y garantizar la sincronización y funcionamiento en conjunto del brazo robótico y el equipo de soldadura GMAW, así como para establecer los parámetros para la aplicación de soldadura en la unión de placas de acero 1018. Finalmente, se llevó a cabo la aplicación del robot industrial en diversas actividades educativas, por ejemplo; en prácticas escolares, capacitaciones, diplomados y clases, brindando a los estudiantes la oportunidad de aprender sobre robótica industrial y aplicaciones de soldadura en un entorno educativo y práctico.

La reingeniería de un robot industrial de seis grados de libertad de la marca Fanuc R-2000iA/210F se aprecia en la Figura 3, esto se logra inicialmente a través de la instalación del robot en laboratorio para realizar su conexión eléctrica y mantenimiento correctivo de componentes mecánicos y estéticos de pintura. Una vez se puso en marcha la programación de las rutinas para las trayectorias del robot, este se integró a una máquina de soldar Miller modelo XMT350 para empezar con las pruebas piloto en las placas de acero AISI 1018. Para ello se tuvieron que ajustar diferentes parámetros de soldadura como el voltaje, amperaje, velocidad de alimentación, velocidad de soldadura, etc. Esto con el fin de garantizar la calidad en las uniones a efectuar.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 41, pp. 583 - 593.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

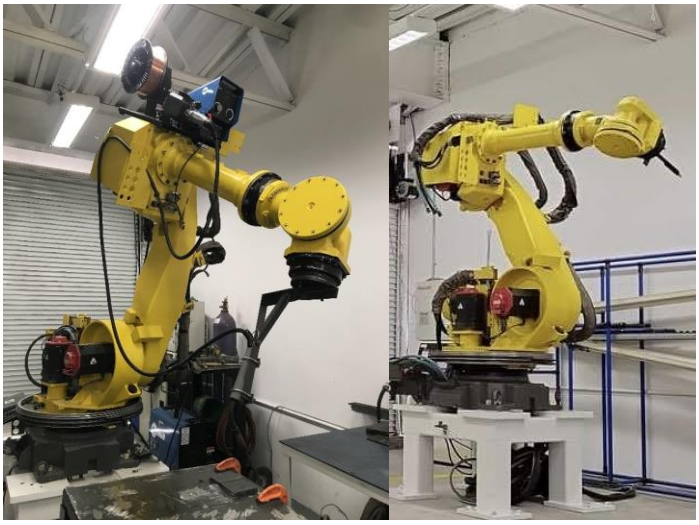


Figura 3: Robot industrial Fanuc R-2000iA/210F instalado en el laboratorio de procesos.

2.2. Configuración Experimental Para Soldar.

El robot cuenta con un efector final, en el que se encuentran disponibles 8 entradas y salidas digitales, las entradas denominadas como RDI y las salidas como RDO, acompañadas con el número de puerto correspondiente tal y como se muestra en la Figura 4. De estas se tomó la salida RDO3 para activar la antorcha conectada a la máquina de soldar Miller modelo XMT350.

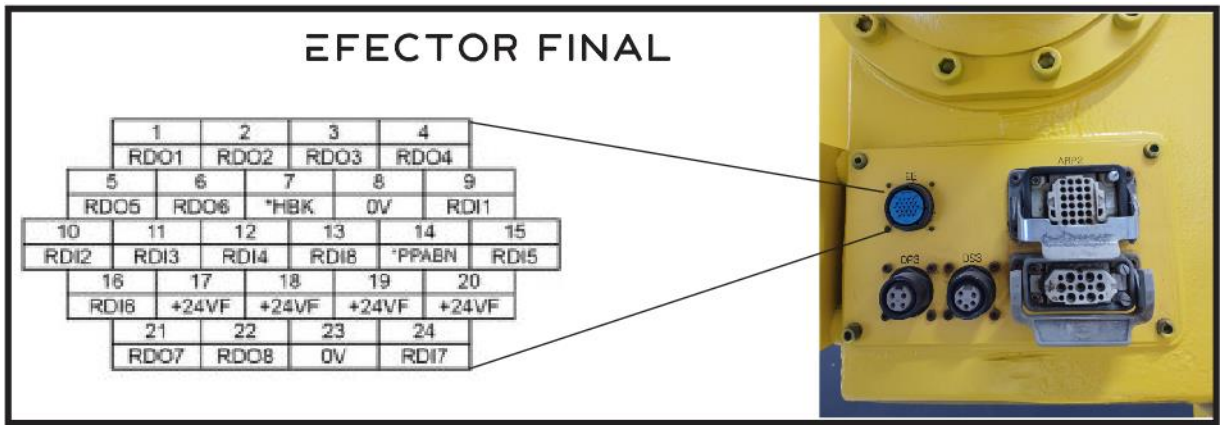


Figura 4: Efector final del robot Fanuc R-2000iA/210F

La interconexión eléctrica se realizó con ayuda de relevadores, con lo que se complementa la integración de la máquina de soldar al robot, como se muestra en la Figura 5.

Figura 5: Interconexión entre soldadora y robot mediante relevadores.

Para finalizar el proceso, la rutina del programa le indica al robot alejarse a su zona de seguridad, denominada como posición HOME como se aprecia en la Figura 6.

Figura 6: Robot industrial Fanuc R-2000iA/210F instalado en el laboratorio de procesos.

En la Figura 7 se pueden observar el diagrama de control del robot para realizar la soldadura GMAW. La señal RDO3 es la salida digital número 3 controlada y accionada por el robot, al ser activada por el programa realizado por el robot, permite pasar de 24 VCD al relevador número 1, al ser activada la terminal A1 complementa el circuito para accionar la bobina del relevador R1, que a su vez enlaza a los contactos 3 y 4 normalmente abiertos R1, cerrando el circuito del motor de alimentación de alambre.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 41, pp. 583 - 593.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

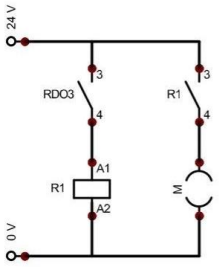


Figura 7: Diagrama de control utilizado.

Para finalizar el arco eléctrico es necesario desactivar la salida RDO3. De igual manera la antorcha conserva su sistema original de accionamiento el cual se activa mediante un botón pulsador que posee la antorcha en el gatillo, denominado como GAT, lo cual se puede observar también en la Figura 8.

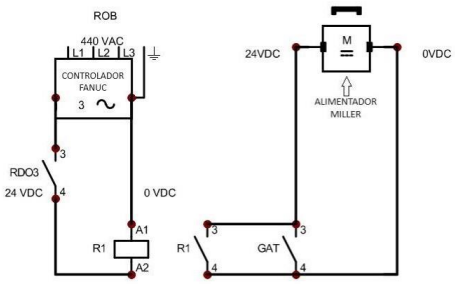


Figura 8: Diagrama de fuerza utilizado.

Para producir el arco eléctrico, se conectó el cable de masa que proviene de la máquina de soldar a la mesa de trabajo, después se dio inicio al ciclo del programa previamente grabado en el robot, como se muestra en la Figura 9.

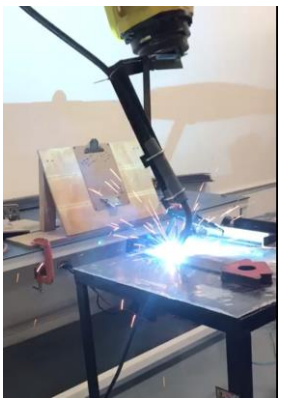


Figura 9: Aplicación de proceso de soldadura GMAW en placas de acero 1018.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 41, pp. 583 - 593.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

El cual realizo una trayectoria en línea recta de 90 mm, la antorcha se colocó a una altura de 9 mm sobre la unión a realizar. Se comenzó el recorrido en el punto A, y después de 18 segundos, hace una pausa durante 2 segundos en el punto B, esto con el fin de evitar defectos de socavación, antes de cortar el arco eléctrico, como se muestra en la Figura 10.

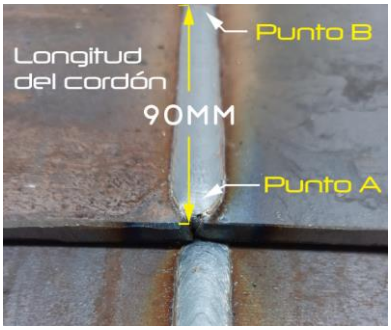


Figura 10: Trayectoria en la aplicación de la soldadura.

2.3. Aplicación de Soldadura en Acero AISI 1018.

El material empleado para las uniones es un acero de bajo contenido de carbono AISI 1018 con medidas de 100 mm x 73 mm y con un espesor de 4.5 mm. Las placas se prepararon para una configuración a tope con una ranura en V de 60°, como se muestra en la Figura 11.

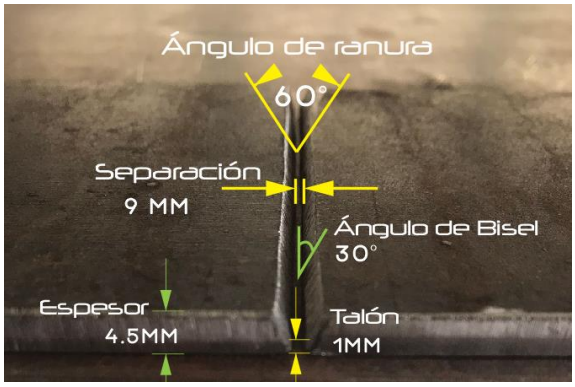


Figura 11: Configuración a tope con una ranura en V de 30°.

Para la aplicación de las soldaduras se utilizó un brazo robótico de seis grados de libertad de la marca Fanuc (R-2000iA/210F) que es capaz de soportar y controlar la pistola de soldadura para el proceso GMAW, se utilizó como electrodo el material de aporte ER70S-6 con un diámetro de 0.9 mm, como se observa en la Figura 12.

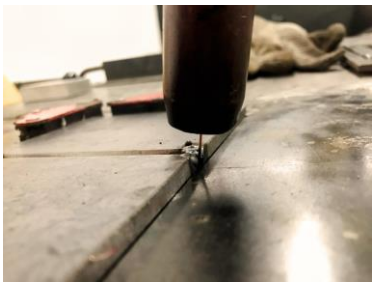


Figura 12: Electrodo ER70S-6

Los parámetros empleados para la unión de este proceso están exhibidos en la Tabla 1. Las soldaduras se realizaron de una sola pasada. Se utilizó el modo de transferencia en corto circuito y se utilizó como atmosfera protectora una mezcla de 90%Ar-10%CO2.

Tabla 1. Parámetros de soldadura utilizados para las muestras.

Designación	Parámetro			
	Corriente (A)	Voltage (V)	Velocidad de Soldadura (mm/s)	Velocidad de Alimentación (mm/s)
Muestra 1	250	20	2.5	3
Muestra 2	270	21	3	3.5
Longitud de Arco: 1 mm. Extensión del Electrodo: 7 mm. Posición: 1G.				

Posterior a las uniones se realizó una preparación metalográfica a las muestras en base a la norma ASTME3, seccionando de forma transversal al cordón de soldadura. Para revelar la macroestructura de las muestras se empleó el reactivo Nital (5%) durante 5 segundos. La evaluación de la macroestructura se llevó a cabo utilizando un estereoscopio óptico (NIKON SMZ 745T) donde se analizó la calidad de las uniones y se hicieron mediciones de las partes principales del cordón de soldadura.

3. Resultados

La Figura 13 muestra las uniones efectuadas, en las cuales se realizó una inspección visual para evaluar posibles defectos o discontinuidades que se pudieran presentar en el cordón de soldadura. Se observa que no existen discontinuidades visibles y que la apariencia del cordón de soldadura es adecuada y con una buena calidad superficial libre de defectos.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 41, pp. 583 - 593.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

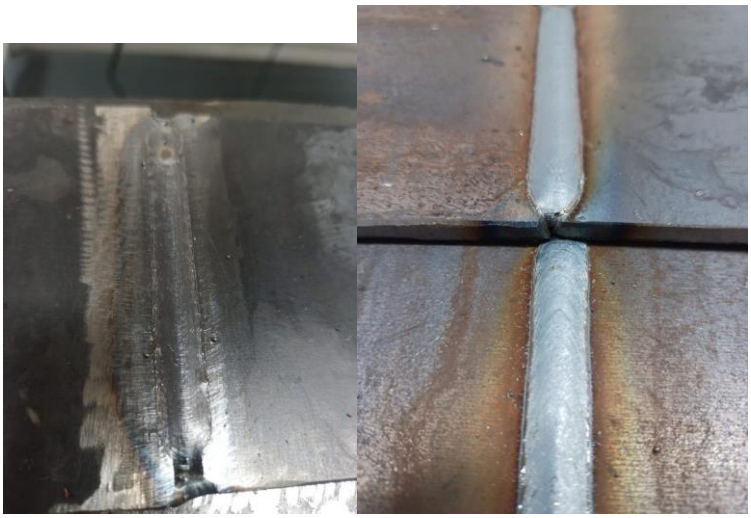


Figura 13: Resultado final de la soldadura adherida a la placas de acero 1018.

En la Figura 14 se presentan las macrografías de las uniones. Donde se obtuvieron soldaduras con una penetración completa en la aplicación bajo los dos conjuntos de parámetros (Tabla 1) además de presentar una apariencia adecuada y libre de defectos como poros o grietas (Figura 14-a, c). Lo que indica que el funcionamiento de La soldadora Miller XMT350 conectada al brazo robótico se estableció de manera adecuada. Para la muestra 1 (Figura 14-b) se observa que el ancho del cordón en la parte superior es de 8.89 mm lo que indica que es menor al presentado para la muestra 2 (Figura 14-b) que fue de 13.57 mm. Esto se debe a que al subir el voltaje se requiere una mayor velocidad de alimentación del electrodo lo que genera una mayor deposición en la unión.

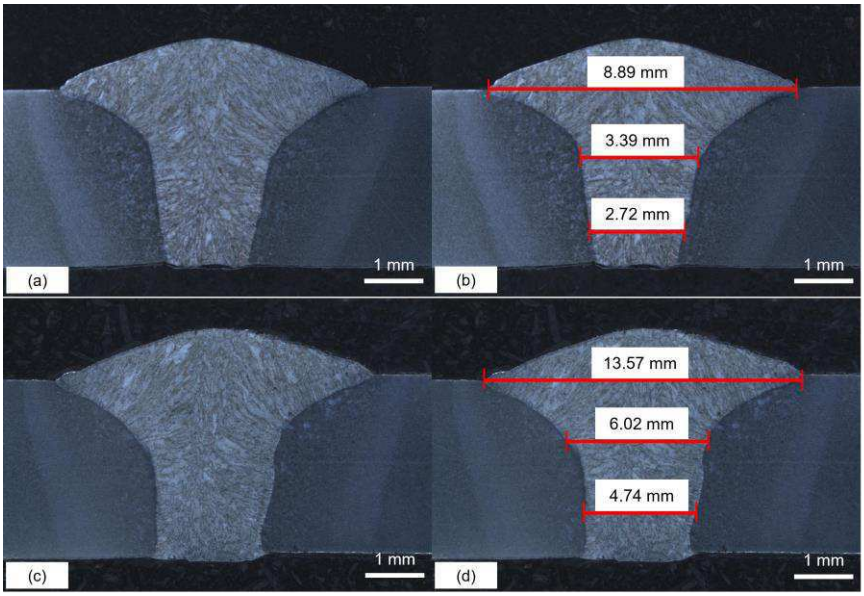


Figura 14. Macrografías de las uniones, a) muestra 1, b) medición del ancho del cordón para la muestra 1, c) muestra 2, d) medición del ancho del cordón para la muestra 2.

4. Conclusiones.

- Las soldaduras presentan una buena apariencia visual libre de defectos y discontinuidades.
- Al seccionar y preparar mecanográficamente las muestras se observa que las soldaduras tienen una penetración completa lo que indica que la configuración del brazo robótico se dio de manera adecuada.
- A través de esta investigación en donde se aplican procesos de la reingeniería se permite habilitar áreas de trabajo y de estudio para los alumnos en donde puedan realizar prácticas, proyectos de investigación, cursos y diplomados, así como la creación de un laboratorio de procesos.
- Como trabajo a futuro se pretende utilizar esta configuración experimental para otras aplicaciones industriales como el caso de corte plasma, aplicación de pintura, sujeción y posicionamiento de piezas y escaneado 3D.

Referencias

[4] Fragapane, G. et al. *"Autonomous mobile robots in hospital logistics"*. En: IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems. Springer, págs. 672-679 (2020).
[16] Xiao B., Chen C. y Yin X., *"Recent advancements of robotics in construction*". En: Automation in Construction 144, pág. 104591 (2022).
[5] Hartmann F., Baumgartner M. y Kaltenbrunner M., *"Becoming sustainable, the new frontier in soft robotics"*. En: Advanced Materials 33.19, pág. 2004413 (2021).
[2] Ming Z. et al. *"Reusing industrial robots to achieve sustainability in small and medium-sized enterprises (SMEs)"*. En: Industrial Robot: An International Journal 42.3 págs. 264-273 (2015).
[9] Guamán C. et al. *"Automatizar procesos de producción repetitivos en las PYMES con robots colaborativos"*. En: Revista Universidad y Sociedad 14.2, págs. 220-227 (2022).
[8] Rincon D., Camacho J. y Chaparro D. *"Construcción de un prototipo para la gestión de almacén, dirigido a pequeñas y medianas empresas usando un brazo robótico antropomórfico y un robot agv"*. En: (2023).
[15] Weng A. *"Criterios y requisitos previos para el uso de robots flexibles en las pequeñas y medianas empresas: análisis del mercado y estrategia de entrada en el mismo"*. En: ().
[6] Karastoyanov D. y Karastanev S. *"Reuse of industrial robots"*. En: IFAC-PapersOnLine 51.30 págs. 44-47 (2018).
[10] Shin N. y Kim S., *"Learning about, from, and with Robots: Students' Perspectives"*. En: RO-MAN 2007-The 16th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. IEEE. 2007, págs. 1040-1045.
[3] Cansu C¸ aka, Adı E. y Sayısı O., *"Robotic Technologies in Education and Educational Robotic Applications"*. En: Bilim, E˘gitim, Sanat ve Teknoloji Dergisi (BEST Dergi) 6.2, págs. 179-189. (2022).
[17] Yang K., Liu X. y Chen G., *"The influence of robots on students' computational thinking: A literature review"*. En: International Journal of Information and Education Technology 10.8, págs. 627-631 (2020).
[12] Jain J., Singhal T., *"GMAW cladding on metals to impart anti-corrosiveness: Machine, processes and materials"*. En: (2020).
[14] Vlasov I., et al. *"Structure and Mechanical Behavior of Heat-Resistant Steel Manufactured by Multilayer Arc Deposition"*. En: Metals 13.8 (2023).
[11] Stinson H., et al. *"Comparison of Properties and Bead Geometry in MIG and CMT Single Layer Samples for WAAM Applications"*. En: Metals 11.10 (2021).
[7] Posada R., Marínez R. y Posada G., *"Miradas a las tendencias y desaf´ıos de la educaci´on mediada por TIC según reportes internacionales"*. En: Opuntia Brava 12.4, págs. 283-292 (2020).
[13] Vera F., *"Integraci´on de la Inteligencia Artificial en la Educación superior: Desafíos y oportunidades"*. En: Transformar 4.1, págs. 17-34 (2023).
[1] Aguilar G. et al. *"Inteligencia artificial y la educación universitaria: Una revisión sistemática"*. En: Magazine de las Ciencias: Revista de Investigación e Innovación 8.1, págs. 109-131 (2023).

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 42, pp. 594 - 611.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

App Móvil para Medición de Ángulos Biomecánicos en Rehabilitación en Casa: Innovación en Mecatrónica Médica

Alonso Alejandro Jiménez Garibay, José Guadalupe Uriel Palacios Campos, Yessica Joselin Palacios Mogica y María Dayana Pérez Ledesma

Instituto Tecnológico Nacional de México en Celaya[1], Colegio Nacional de Fisioterapia y Terapia Física A.C. [2]

Resumen

La mecatrónica médica es una disciplina que integra la ingeniería mecánica, electrónica, informática y biomédica para desarrollar dispositivos y sistemas que mejoren el diagnóstico, tratamiento y monitoreo de la salud. El presente trabajo expone el desarrollo y validación de una aplicación móvil orientada a la medición de ángulos biomecánicos durante la realización de ejercicios terapéuticos, con el fin de facilitar la rehabilitación física en el hogar utilizando la monitorización. Para la validación del sistema de medición, se seleccionaron dos ejercicios: el levantamiento pélvico tipo puente, utilizado para mitigar el dolor lumbar, y el levantamiento bilateral de brazos con expansión torácica guiada, destinado a mejorar la capacidad pulmonar y reducir el dolor en los hombros.
La aplicación fue desarrollada para la plataforma Android, empleando la Unidad de Medición Inercial (IMU por sus siglas en inglés) de un smartphone para capturar los ángulos de movimiento. Adicionalmente, se integra una tarjeta de desarrollo modelo Raspberry Pico W con conexión Bluetooth Low Energy, lo que permite el registro y almacenamiento de los datos de manera inalámbrica.
La precisión del sistema fue evaluada mediante 5 repeticiones de cada ejercicio, con una validación a través del software ImageJ, permitiendo la comparación de los ángulos obtenidos por la aplicación móvil con los calculados por técnicas de procesamiento de imágenes. Los resultados obtenidos favorecen la adherencia de los pacientes a sus terapias en casa, proporcionando retroalimentación inmediata sobre su desempeño y progreso, y subrayan la eficacia de la tecnología en entornos de rehabilitación.

Palabras clave: Biomecánica, aplicación móvil, rehabilitación en casa, medición de ángulos, procesamiento de imágenes, ejercicio terapéutico, expansión torácica, levantamiento pélvico, biorretroalimentación, adherencia al tratamiento.

1. Introducción

En las últimas dos décadas, las tecnologías innovadoras han transformado la rehabilitación sensorimotriz. Un análisis exhaustivo de las herramientas disponibles y su nivel de validación revela el impacto significativo de tecnologías como la estimulación eléctrica neuromuscular, la robótica y la realidad virtual en la rehabilitación física y cognitiva [1]. Estas tecnologías han demostrado ser efectivas en mejorar las capacidades funcionales, aunque su aceptación y uso en la práctica clínica aún enfrentan desafíos. En este contexto, el desarrollo de aplicaciones móviles como la presentada en este estudio busca integrar estas innovaciones tecnológicas en un formato accesible y aplicable para la rehabilitación domiciliaria, promoviendo la adherencia y facilitando el monitoreo de los ejercicios terapéuticos en casa.

El dolor lumbar, una de las afecciones más prevalentes a nivel mundial, abarca una combinación de factores físicos, psicológicos y sociales que requieren un enfoque integral para su

manejo y tratamiento [2]. En este contexto, las tecnologías emergentes en rehabilitación, como las aplicaciones móviles que guían ejercicios terapéuticos y ofrecen monitoreo remoto, pueden desempeñar un papel clave en el autocuidado de pacientes que padecen dolor lumbar. Estas soluciones permiten a los usuarios acceder a programas de rehabilitación personalizados que complementan las terapias físicas y psicológicas, ayudando a mejorar la adhesión al tratamiento y potenciando los resultados clínicos.

El ejercicio de levantamiento pélvico ha mostrado ser positivo en la rehabilitación de diversas condiciones musculoesqueléticas. Por ejemplo, un estudio del 2020 encontró que ejercicios específicos como la elevación de la cabeza y las flexiones con torsión reducen significativamente la distancia interrectal en mujeres con diástasis de los rectos abdominales (DRA), lo que indica su efectividad en mejorar la estabilidad del core [3]. Este hallazgo sugiere que ejercicios similares podrían ser beneficiosos para mejorar la estabilidad y reducir el dolor lumbar, proporcionando una base para su inclusión en los programas de rehabilitación para esta afección.

La rehabilitación pulmonar RP es un componente clave en el tratamiento de diversas enfermedades respiratorias, ayudando a mejorar la calidad de vida de los pacientes a través de programas de ejercicio supervisados, educación y apoyo psicosocial [4]. La implementación de programas de rehabilitación en el hogar, como se ha investigado en adultos mayores, puede ser una estrategia efectiva para incrementar la adherencia a los tratamientos y mejorar los resultados en pacientes con enfermedades respiratorias, especialmente en aquellos con movilidad limitada o con dificultades para acceder a centros de rehabilitación.

Para facilitar la correcta ejecución de estos ejercicios y garantizar un seguimiento preciso, es necesario contar con herramientas que permitan medir y controlar los ángulos de movimiento biomecánico, así como registrar los datos de cada sesión. Es aquí donde la mecatrónica médica juega un papel crucial. La mecatrónica médica combina componentes electrónicos, sistemas de control y software con conocimientos médicos para crear dispositivos que mejoren los tratamientos y diagnósticos clínicos [5].

La adherencia a los tratamientos de rehabilitación física es uno de los principales retos que enfrentan los pacientes, especialmente aquellos con discapacidades o limitaciones físicas que dificultan su acceso a programas de rehabilitación tradicionales. Estudios recientes destacan la importancia de desarrollar estrategias innovadoras que aprovechen tecnologías emergentes como las telecomunicaciones, la inteligencia artificial y los dispositivos portátiles para mejorar la accesibilidad y participación en estos programas [6]. En este sentido, la presente aplicación móvil busca precisamente abordar estas limitaciones, proporcionando una herramienta portátil y accesible para el monitoreo y seguimiento de ejercicios terapéuticos en casa.

La rehabilitación basada en el hogar ha demostrado ser una opción efectiva, un estudio reciente destaca que hasta un 15.5% de los pacientes son derivados a programas de rehabilitación en casa, y aquellos que mostraron mayor progreso en su movilidad durante su internamiento tienen más probabilidades de beneficiarse de esta modalidad [7].

2. Estado del arte

El estado del arte en rehabilitación médica se centra en la mecatrónica médica, que integra tecnologías para mejorar la recuperación de los pacientes mediante dispositivos innovadores. La biorretroalimentación proporciona información en tiempo real sobre funciones fisiológicas, permitiendo un enfoque personalizado en el tratamiento. Ejercicios específicos como el levantamiento pélvico (puente) y la rehabilitación pulmonar mediante expansión torácica son fundamentales para aliviar el dolor lumbar y mejorar la función respiratoria, respectivamente.

El uso de aplicaciones móviles facilita el seguimiento del progreso y la comunicación con profesionales de la salud, mientras que los sistemas de sensores inerciales permiten un monitoreo

preciso del movimiento y la postura. Sin embargo, es esencial evaluar los beneficios y desafíos que presentan estas tecnologías para maximizar su impacto en la rehabilitación clínica.

1. Mecatrónica Médica en Rehabilitación

La mecatrónica médica es una disciplina que integra diversas tecnologías y conocimientos de áreas como la ingeniería eléctrica, la ingeniería mecánica y la biomedicina, con el objetivo de mejorar la atención sanitaria y la calidad de vida de los pacientes [5].

En el contexto de la rehabilitación, esta disciplina se ha utilizado para diseñar dispositivos que faciliten la recuperación funcional y proporcionen biorretroalimentación objetiva sobre el desempeño de los ejercicios. La integración de sensores, actuadores y sistemas de control en dispositivos de rehabilitación ha demostrado ser eficaz para optimizar los resultados terapéuticos y mejorar la adherencia del paciente a los programas de tratamiento.

En el campo de la rehabilitación, la mecatrónica juega un papel crucial al crear dispositivos que ayudan en la recuperación funcional, especialmente en pacientes que sufren de trastornos musculoesqueléticos, neurológicos o cardiovasculares. Estos sistemas mecatrónicos permiten a los terapeutas monitorear objetivamente los progresos del paciente y ajustar los programas de rehabilitación en función de datos precisos y en tiempo real [7].

La mecatrónica está revolucionando el ámbito de la salud al desarrollar dispositivos y sistemas que no solo mejoran la calidad de vida de los pacientes, sino que también facilitan la implementación de técnicas avanzadas, como la biorretroalimentación. Al integrar tecnología con biomedicina, se están creando nuevas oportunidades para ofrecer tratamientos más precisos y personalizados, optimizando la rehabilitación física a través de la retroalimentación en tiempo real sobre el estado fisiológico del paciente [8].

2. Biorretroalimentación (Biofeedback) en Rehabilitación Física

La biorretroalimentación es una técnica utilizada en la rehabilitación para proporcionar información biológica a los pacientes en tiempo real. Esta práctica ha estado en uso durante más de cincuenta años y se centra en facilitar patrones de movimiento normales tras una lesión. La biorretroalimentación permite a los usuarios obtener información adicional sobre procesos fisiológicos que normalmente no son conscientes, lo cual puede mejorar su control sobre estos procesos [9].

Giggins et al. en 2013 presentó un artículo dónde identifica varias técnicas de biofeedback que se dividen en categorías basadas en sistemas fisiológicos y biomecánicos. Dentro del biofeedback fisiológico, se destaca el biofeedback neuromuscular, que incluye la electromiografía (EMG) para convertir señales mioeléctricas en información visual o auditiva, útil para mejorar la actividad muscular o reducir el tono en músculos espásticos, y el ultrasonido en tiempo real (RTUS), empleado para tratar dolor lumbar y disfunciones del suelo pélvico. El biofeedback respiratorio guía ejercicios de respiración, eficaz en el tratamiento de la hipertensión y la ansiedad, mientras que el biofeedback cardiovascular permite controlar la frecuencia cardíaca mediante monitores o electrocardiogramas, ayudando a reducir la presión arterial y la frecuencia cardíaca.

En el ámbito del biofeedback biomecánico, se incluyen sistemas de medición del movimiento y control postural, utilizados para mejorar el equilibrio y la estabilidad en poblaciones con dificultades posturales, como ancianos o personas con trastornos vestibulares. Además, el biofeedback de fuerza mide y retroalimenta la fuerza aplicada en tareas específicas para mejorar el rendimiento físico.

Finalmente, el biofeedback inmersivo en entornos de realidad virtual (VR) proporciona retroalimentación gráfica o audiovisual, mejorando el compromiso del paciente y la efectividad de la terapia en la rehabilitación física.

Para futuras investigaciones en el ámbito del biofeedback, se recomienda diseñar sistemas de retroalimentación adaptados a las necesidades de los fisioterapeutas, utilizando dispositivos de asistencia y señales sensoriales que mejoren su eficacia en la rehabilitación. Es fundamental incluir una caracterización precisa del nivel de discapacidad de los pacientes antes de las intervenciones, lo que permitirá obtener resultados más fiables. Además, los protocolos de intervención deben especificarse detalladamente para asegurar la reproducibilidad de los estudios. Es necesario realizar ensayos clínicos controlados que evalúen la efectividad de la retroalimentación en la recuperación motora, especialmente utilizando sensores y actuadores portátiles que ofrezcan una retroalimentación personalizada. También se debe fomentar la integración de estos sistemas con dispositivos de asistencia, como exoesqueletos, o aplicaciones móviles para promover la participación activa del paciente [10].

3. Ejercicio de Levantamiento Pélvico (Puente) para el Dolor Lumbar

El dolor lumbar bajo, o dolor en la parte baja de la espalda, puede manifestarse de distintas formas: como dolor nociceptivo (causado por daño a tejidos, lesiones o inflamación), dolor neuropático (radicular, que se extiende hacia las piernas, a menudo por hernias discales), o dolor nociplástico (por amplificación del dolor en el sistema nervioso central, sin causa física clara). Se localiza entre la última costilla y la cresta ilíaca, aunque puede coexistir con molestias en los glúteos, que son áreas anatómicas distintas [2].

El levantamiento pélvico, comúnmente conocido como ejercicio de puente, se ha establecido como una intervención eficaz para el tratamiento del dolor lumbar y las molestias en la región lumbar. Este ejercicio fortalece los músculos del core y mejora la estabilidad pélvica, lo cual es crucial para la prevención y el manejo del dolor en la parte baja de la espalda. Diversos estudios han demostrado que la incorporación del ejercicio de puente en los programas de rehabilitación puede reducir significativamente los síntomas del dolor lumbar, mejorar la funcionalidad y promover la recuperación a largo plazo [11].

4. Rehabilitación Pulmonar mediante Expansión Torácica

La rehabilitación pulmonar (RP) ofrece beneficios significativos para pacientes con diversas enfermedades respiratorias. Estos incluyen la reducción de la disnea, disminución de la fatiga, y mejora en la capacidad de ejercicio, permitiendo a los pacientes llevar una vida más activa. Además, contribuye al bienestar emocional, mejorando el control de la ansiedad y la depresión. Los pacientes adquieren mayor autocontrol sobre su enfermedad y experimentan una mejor calidad de vida, con menos hospitalizaciones. La RP combina educación, apoyo psicológico y estrategias personalizadas, cuyos efectos positivos se mantienen a largo plazo [12].

La RP es un tratamiento esencial para pacientes con enfermedades respiratorias, especialmente aquellos con limitaciones funcionales y comorbilidades. Los candidatos ideales incluyen personas con obstrucción grave del flujo aéreo y enfermedades respiratorias avanzadas que limitan sus actividades diarias. La RP es segura y efectiva, con una baja incidencia de complicaciones, y requiere de la motivación del paciente para participar activamente. Además, es importante que los pacientes estén informados sobre sus beneficios, y que su salud general y edad sean evaluadas para asegurar una participación sin riesgos [4].

El ejercicio de levantamiento de brazos ofrece importantes beneficios físicos y psicológicos, especialmente en la rehabilitación de pacientes con limitaciones motoras, como los que han sufrido un accidente cerebrovascular. Este ejercicio mejora la función motora, fortalece los músculos del hombro y brazo, aumenta la amplitud de movimiento y reduce el dolor en las extremidades afectadas. Además, al realizarse de forma bilateral, favorece la actividad cerebral y la coordinación, esenciales para tareas cotidianas [13]. Vinculado a la rehabilitación pulmonar mediante la expansión torácica, el levantamiento de brazos también estimula la conciencia corporal y el control respiratorio, ayudando a mejorar la capacidad pulmonar y la calidad de vida.

5. Aplicaciones Móviles en Rehabilitación:

Las aplicaciones móviles para la rehabilitación se están convirtiendo en herramientas esenciales para el seguimiento y la mejora de la adherencia al tratamiento. Estas aplicaciones permiten la monitorización en tiempo real de los ejercicios, proporcionando retroalimentación inmediata a los pacientes y facilitando el ajuste de los parámetros de ejercicio según las necesidades individuales. La capacidad de registrar datos y generar gráficos para el análisis posterior ofrece una ventaja significativa en la evaluación del progreso del paciente y en la adaptación de los programas de rehabilitación

El uso de aplicaciones móviles como herramienta para la rehabilitación es favorable porque facilita el acceso remoto a servicios que tradicionalmente requerían la presencia física del paciente. La tecnología de la información y la comunicación, incluida la telerehabilitación mediante aplicaciones móviles, permite ofrecer apoyo posoperatorio a los pacientes sin la necesidad de desplazarse, lo que favorece la recuperación y reduce las barreras geográficas y temporales para acceder a los servicios de salud [14].

Además, las aplicaciones móviles permiten integrar intervenciones psicológicas y físicas, como se demuestra con la aplicación BrainHeart, la cual ha mejorado significativamente el bienestar físico y mental de las personas mayores a través de un programa de ejercicios mentales y mindfulness. Estas intervenciones no solo facilitan la rehabilitación en casa, sino que también promueven la motivación, la autonomía y la calidad de vida, aspectos clave para una recuperación integral en poblaciones vulnerables [15].

En adición, las aplicaciones móviles también han demostrado ser efectivas en la autogestión de ejercicios y el entrenamiento físico, como en la rehabilitación ortopédica. Los estudios indican que estas herramientas no solo mejoran la interacción de los pacientes con los ejercicios, sino que también proporcionan datos valiosos para monitorear el progreso y ajustar las intervenciones de manera personalizada, lo que las convierte en un recurso valioso para los profesionales de la salud [16].

6. Sistemas de Sensores Inerciales en rehabilitación:

El uso de sensores inerciales en tecnologías de rehabilitación ha demostrado ser efectivo en el análisis y monitoreo del movimiento humano, permitiendo una evaluación precisa de la orientación y las articulaciones del cuerpo. Estos sensores, como las Unidades de Medida Inercial (IMU), que combinan acelerómetros, giróscopos y magnetómetros, son esenciales para evaluar el equilibrio y la postura en tiempo real. Además, su integración en dispositivos portátiles ha facilitado su uso en diversas aplicaciones clínicas, desde la rehabilitación de pacientes con discapacidades motoras hasta la predicción de riesgos de caídas, destacando su valor como herramientas en la rehabilitación moderna [17].

Comparados con otros sistemas de análisis de movimiento, los sensores inerciales ofrecen una solución más sencilla y eficaz para los terapeutas. A diferencia de los sistemas basados en cámaras o seguimiento electromagnético, que son costosos y complejos, los sensores inerciales proporcionan una evaluación objetiva y cuantitativa de la capacidad de movimiento del paciente. Esto permite una medición precisa en diversas direcciones de marcha, facilitando el diagnóstico y monitoreo en tiempo real sin depender de la interpretación subjetiva del terapeuta. Su facilidad de instalación y uso los convierte en una opción ideal para el entorno clínico, permitiendo una rehabilitación más efectiva y accesible [18].

Un ejemplo concreto del uso de sensores inerciales en rehabilitación es el sistema Riablo™, que combina estos sensores con retroalimentación activa para ayudar en la recuperación de pacientes postoperatorios. El sistema permite monitorear en tiempo real los movimientos de las articulaciones durante ejercicios específicos, mostrando alta precisión en la medición de ángulos y ofreciendo retroalimentación inmediata. Además, este sistema es adaptable a diversas condiciones clínicas, incluyendo pacientes con enfermedad de Parkinson, lo que resalta su versatilidad y efectividad en la mejora del rendimiento de la marcha y la recuperación física [19].

7. Conclusiones y Futuras Direcciones

La implementación de tecnologías de mecatrónica médica y aplicaciones móviles en la rehabilitación ofrece numerosos beneficios, incluyendo la personalización de los tratamientos, la monitorización en tiempo real y la mejora en la adherencia del paciente. Sin embargo, también enfrenta desafíos, como la necesidad de garantizar la precisión de las mediciones, la seguridad de los datos y la accesibilidad para todos los pacientes. La investigación continua en este campo es esencial para superar estos desafíos y maximizar el impacto positivo de estas tecnologías en la rehabilitación.

El uso de aplicaciones móviles y dispositivos mecatrónicos en la rehabilitación tiene el potencial de transformar la manera en que se llevan a cabo los programas de tratamiento. La combinación de tecnología avanzada con métodos de rehabilitación convencionales puede proporcionar una solución efectiva para mejorar la adherencia del paciente y optimizar los resultados clínicos. Se requiere investigación adicional para validar la efectividad de estos enfoques en una variedad de contextos y poblaciones, así como para desarrollar nuevas tecnologías que aborden las necesidades emergentes en el campo de la rehabilitación.

3. Metodología

En este apartado se detalla el proceso seguido para desarrollar el sistema de monitoreo y control de ejercicios basados en ángulos biomecánicos, utilizando una Raspberry Pi Pico W y una aplicación móvil desarrollada en MIT App Inventor. La metodología se divide en tres secciones clave.

En primer lugar, se mencionan los materiales y herramientas empleados, tanto a nivel de hardware como de software.

1. Materiales y herramientas

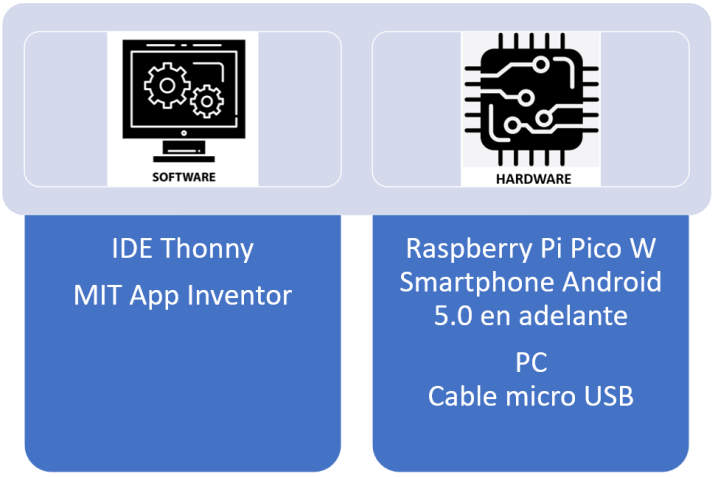


Figura 1. Materiales y herramientas a emplear.

A continuación, se explica el proceso de desarrollo, que incluye la implementación del código en Micropython para la Raspberry Pi Pico W, encargado de gestionar la conexión Bluetooth Low Energy (BLE) y la recepción de datos. Asimismo, se detalla la lógica detrás del desarrollo de la aplicación móvil diseñada para interactuar con la Raspberry Pi y permitir la configuración de parámetros para el monitoreo de ejercicios.

2. Código Micropython

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 42, pp. 594 - 611.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

```python
import time
import bluetooth
import os
from machine import Pin
from ble_simple_peripheral import BLESimplePeripheral
```

Figura 2. Importación de librerías.

Se importan las librerías necesarias para el funcionamiento del script:

- time: para manejar funciones relacionadas con el tiempo.
- bluetooth: para la comunicación BLE.
- os: para operaciones relacionadas con el sistema de archivos.
- Pin: para controlar los pines de la máquina.
- BLESimplePeripheral: para facilitar la implementación del periférico BLE.

```python
# Crear objeto BLE
ble = bluetooth.BLE()
sp = BLESimplePeripheral(ble)
```

Figura 3. Inicialización del BLE.

- Se crea un objeto BLE que permitirá la comunicación Bluetooth Low Energy.
- Se inicializa un periférico simple BLE con BLESimplePeripheral.

```python
# Variables para almacenar los parámetros
Repeticiones = 0
Angulo = 0
Segundos = 0
data_str = ""  # Datos recibidos
aux = False  # Control para iniciar el almacenamiento de datos
tiempos = []
angulos = []

MAX_VALOR_Ejer1 = 50  # Valor máximo para Angulo
MAX_VALOR_Ejer2 = 180  # Valor máximo para Angulo
MAX_VALOR_R = 25  # Valor máximo para Repeticiones
```

Figura 4. Declaración de Variables.

- Se definen variables para almacenar los parámetros de la rutina:
  - Repeticiones: Número de repeticiones.
  - Angulo: Ángulo actual.
  - Segundos: Duración en segundos.
  - data_str: Datos recibidos desde el smartphone.
  - aux: Controla el inicio del almacenamiento de datos.
  - tiempos y ángulos: Listas para almacenar el tiempo y ángulo respectivamente.
  - Se establecen los valores máximos permitidos para ángulos y repeticiones.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 42, pp. 594 - 611.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

```python
def on_rx(data):
    global Repeticiones, Angulo, Segundos, data_str, aux
    data_str = data.strip()  # Eliminar espacios en blanco y saltos de línea

    if 'A' in data_str:
        Angulo += 3
        if Angulo > MAX_VALOR_AyS:
            Angulo = 0
        print(f"Angulo: {Angulo}°")

    elif 'B' in data_str:
        Angulo -= 3
        if Angulo < 0:
            Angulo = MAX_VALOR_AyS
        print(f"Angulo: {Angulo}°")

    elif 'C' in data_str:
        Segundos += 1
        if Segundos > MAX_VALOR_AyS:
            Segundos = 0
        print(f"Segundos: {Segundos}s")

    elif 'D' in data_str:
        Segundos -= 1
        if Segundos < 0:
            Segundos = MAX_VALOR_AyS
        print(f"Segundos: {Segundos}s")

    elif 'E' in data_str:
        Repeticiones += 1
        if Repeticiones > MAX_VALOR_R:
            Repeticiones = 0
        print(f"Repeticiones: {Repeticiones}R")

    elif 'F' in data_str:
        Repeticiones -= 1
        if Repeticiones < 0:
            Repeticiones = MAX_VALOR_R
        print(f"Repeticiones: {Repeticiones}R")

    elif 'G' in data_str:  # Inicio de la rutina
        print("Iniciando la rutina de almacenamiento de datos")
        aux = True
```

Figura 5. Función on_rx(data).

- Esta función se encarga de manejar la recepción de datos a través de BLE.
- Los datos recibidos son procesados para:
    - Aumentar o disminuir el Angulo en 3 grados.
    - Ajustar el Segundos y Repeticiones.
    - Iniciar el almacenamiento de datos con el comando 'G'.
    - Almacenar ángulos recibidos desde el smartphone si son dígitos.

Líneas Clave:

- data_str = data.strip(): Elimina espacios en blanco.
- if 'A' in data_str:: Maneja el incremento del ángulo.
- elif data_str.isdigit(): Almacena los ángulos recibidos.

```python
# Función principal de la rutina
def rutina():
    global aux, Angulo, Repeticiones, Segundos, angulo_objetivo, Angulo_recibiendo

    for r in range(Repeticiones):
        # Esperar hasta que el ángulo recibido sea igual al ángulo objetivo
        while Angulo_recibiendo < angulo_objetivo:
            print(f"Ángulo recibido: {Angulo_recibiendo}°")
            time.sleep(0.5)  # Esperar un momento antes de volver a imprimir

        print("Comienza tiempo de contracción")
        for s in range(Segundos):
            print(f"Segundos transcurridos: {s + 1}")
            time.sleep(1)

        # Bajar ángulo hasta cero
        while Angulo_recibiendo > 0:  # Asegurarse de que el ángulo baje hasta cero
            print(f"Bajando ángulo: {Angulo_recibiendo}°")
            time.sleep(0.5)

        print(f"Siguiente repetición ({r + 1}/{Repeticiones})")

    print("Rutina finalizada")
    aux = False  # Finalizar la rutina
```

Figura 6. Función rutina ().

- Esta función se ejecuta cuando se inicia la rutina de almacenamiento de datos.
- Se asegura de que el dispositivo esté conectado y escucha los datos entrantes.
- Finaliza cuando la conexión BLE se cierra.

Líneas Clave:

- while sp.is_connected(): Verifica la conexión BLE.
- sp.on_write(on_rx): Llama a on_rx para procesar datos.

```
# Bucle principal
while True:
    if sp.is_connected():
        sp.on_write(on_rx)  # Esperar los datos recibidos

    if aux:  # Cuando se haya recibido la señal para iniciar ('G')
        rutina()  # Llamar a la rutina para comenzar a almacenar los datos
        guardar_datos_csv()  # Guardar los datos cuando termine la rutina

        # Resetear las variables después de guardar
        tiempos = []
        angulos = []
```

Figura 7 Bucle Principal.

- El bucle principal mantiene el programa en ejecución.
- Escucha los datos BLE y verifica si se debe iniciar la rutina de almacenamiento.
- Una vez completada la rutina, guarda los datos en un archivo CSV y reinicia las listas de tiempos y ángulos.

3. Programación de bloques de la aplicación móvil

1. Pantalla de inicio

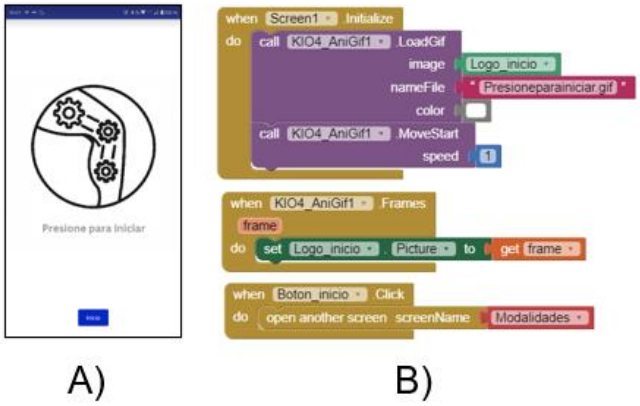


Figura 8. A) Pantalla de inicio, B) Bloques para cargar archivo .gif.

- Cuando inicializa la aplicación llama la función cargar archivo .gif y se ajusta la velocidad.
- Se configura el frame en el archivo .gif.
- Cuando se aprieta el botón inicio abre a la siguiente pantalla “Modalidades”.

2. Menú selector

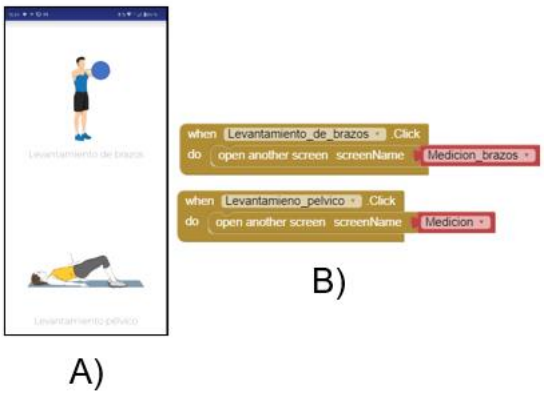


Figura 9 A) Menú selector de ejercicios. B) Bloques para botón seleccionador.

- Se agrega una imagen clickeable para abrir la función de medición en el ejercicio levantamiento bilateral de brazos.
- Se agrega una imagen clickeable para abrir la función de medición en el ejercicio levantamiento pélvico tipo puente.

En ambos ejercicios se abre una pantalla con el mismo panel de control para configurar las métricas de importancia: ángulo al que se desea alcanzar, el tiempo en segundos de contracción una vez alcanzado el ángulo y las repeticiones para realizar el ejercicio como se observa en la Figura 10.

Figura 10. Panel de control para medición de ángulos durante ejecución de rutina.

La metodología de la configuración es la siguiente:

Una vez conectada la Raspberry pi Pico W estará esperando conexión BLE con el nombre de dispositivo “Pico”, en la aplicación se configura que no se puede presionar ningún botón hasta realizar la conexión.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 42, pp. 594 - 611.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

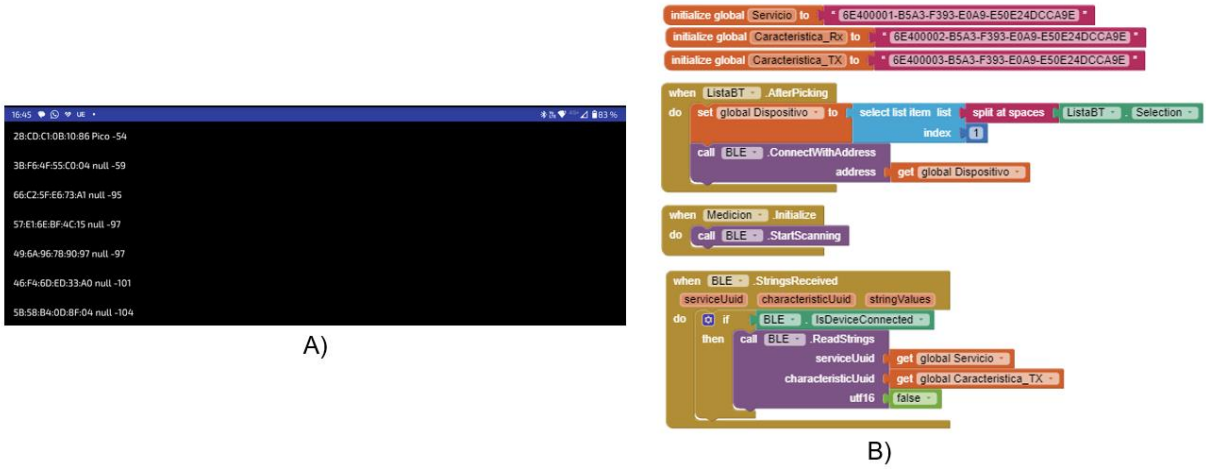


Figura 11. A) Lista de dispositivos BLE, B) Bloques relacionados a la conexión BLE.

Se selecciona el dispositivo de interés, tras un tiempo corto se realiza la conexión, desaparece el logo de bluetooth y se procede a ingresar los parámetros deseados para la rutina a ejecutar.

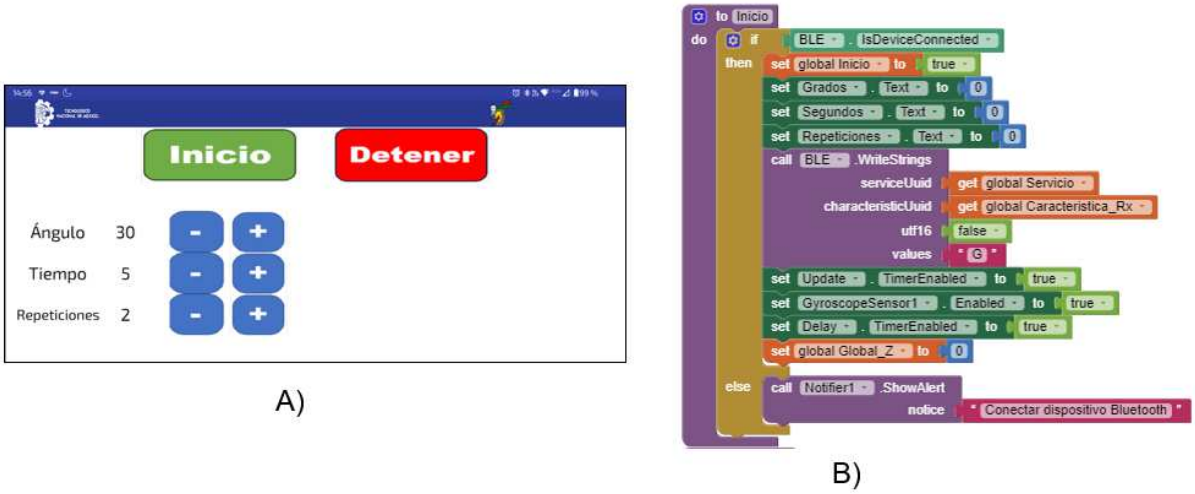


Figura 12. A) Ingreso de parámetros deseados para rutina, B) Programación del botón Inicio.

Cada vez que se alcanza uno de los parámetros ingresados el smartphone realiza una notificación mediante vibración y un sonido diferente para notificar al usuario que se alcanzó el ángulo deseado, que transcurrió el tiempo de contracción o que finalizó las repeticiones ingresadas

Una vez ingresados los parámetros se resetean a cero las etiquetas y se comienza a realizar la medición de los ángulos mediante el IMU del smart pone en el eje Z, se configura como se observa en la Figura 13.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 42, pp. 594 - 611.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

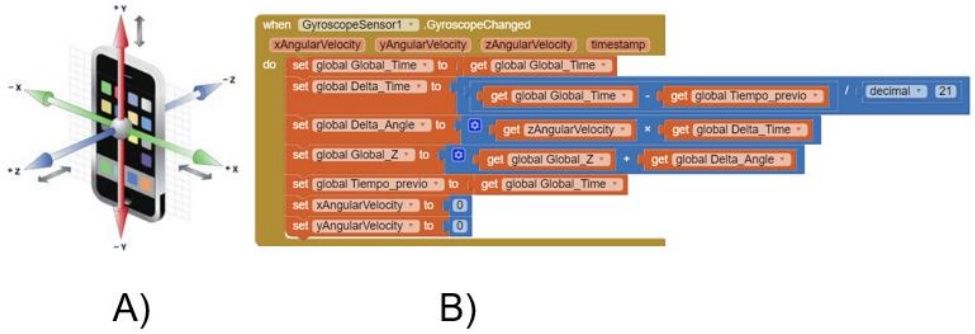


Figura 13. A) Sistema 3D de un smartphone, B) Configuración del giroscopio para medición en el eje Z.

La función que se emplea se asocia a la velocidad angular en (°/s) y se puede interpretar de la siguiente manera:

$$\text{Ángulo actual}(t) = \text{Ángulo actual}(t-1) + (\text{Velocidad angular}Z \times (\text{Tiempo actual}(t) - \text{Tiempo previo}(t-1))) \quad (1)$$

Posteriormente aparece una etiqueta con fuente más grande con la medición actual del ángulo y se actualiza cada 100ms.

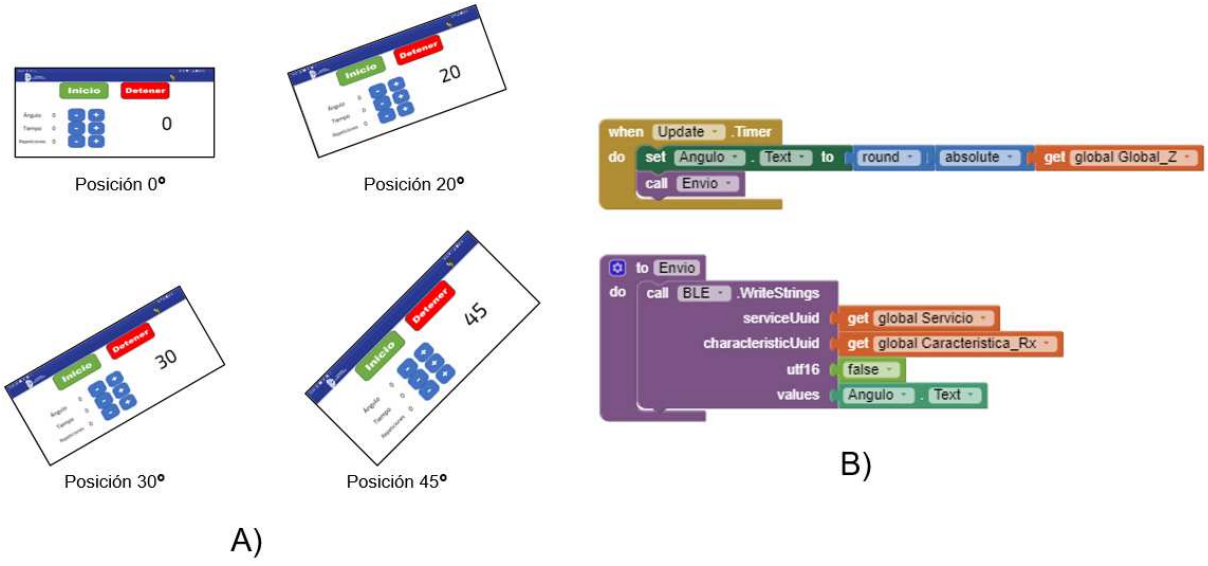


Figura 14. A) Medición de ángulo en el eje Z, B) Bloques de la actualización de la etiqueta "Ángulo".

Al finalizar las repeticiones ingresadas el usuario simplemente oprime el botón de detener desconecta la comunicación BLE y envía a la pantalla de inicio para volver a comenzar otra rutina.

Finalmente, se presenta la metodología empleada para realizar el monitoreo de los ángulos biomecánicos durante los ejercicios. Esto abarca la conexión Bluetooth entre los dispositivos, la configuración de parámetros como el ángulo deseado, el tiempo de contracción, y el número de repeticiones, junto con el procedimiento para capturar y almacenar los datos generados durante el ejercicio.

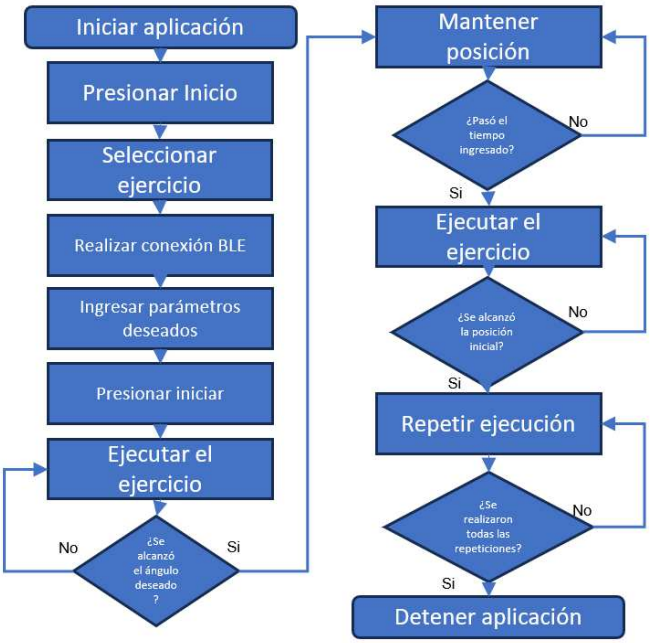


Figura 15 Diagrama de flujo de la metodología para monitoreo de ángulos biomecánicos.

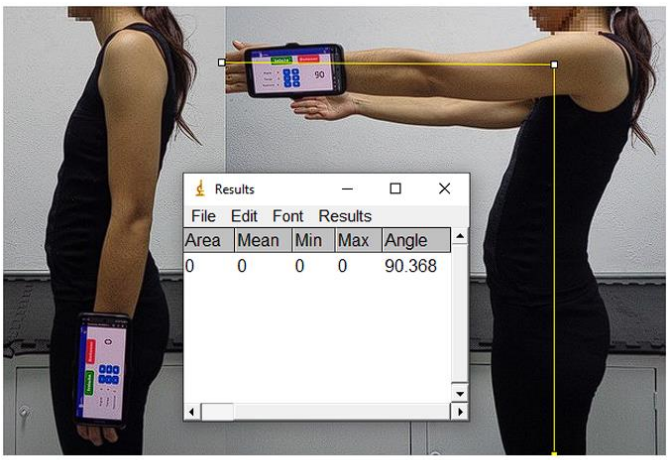
4. Resultados

En la presente sección se exponen los resultados obtenidos tras la implementación y validación del sistema propuesto para la medición de ángulos biomecánicos durante ejercicios terapéuticos. Se detallan los datos recogidos por la aplicación móvil, los cuales fueron comparados con los resultados obtenidos mediante técnicas de procesamiento de imágenes. Además, se evaluó la precisión del sistema en distintas condiciones, destacando su rendimiento en la medición de ángulos y su capacidad para proporcionar retroalimentación en tiempo real durante la realización de los ejercicios seleccionados. Estos resultados permiten validar la efectividad y aplicabilidad del sistema en el contexto de la rehabilitación física.

Se invitó a una colaboradora para realizar dichos ejercicios, no fue necesario un protocolo bioético para este estudio, ya que no implica ninguna intervención invasiva en la participante. El sistema desarrollado se limita únicamente al monitoreo de ángulos biomecánicos mientras se realizan dos tipos de ejercicios terapéuticos, sin manipular el cuerpo de manera directa o interferir en los procesos biológicos del individuo. El enfoque es completamente no invasivo, basado en la captura de movimiento mediante sensores inerciales y la medición de parámetros de forma externa, lo que garantiza la seguridad y bienestar de los participantes sin comprometer su integridad física

1. Ejercicio levantamiento bilateral de brazos.

En el ejercicio de levantamiento bilateral de brazos con expansión torácica, se llevaron a cabo 5 mediciones en tres ángulos diferentes: 90° y 180° con 5 segundos de contracción. Estos ángulos fueron seleccionados para evaluar la amplitud del movimiento y la capacidad de expansión torácica durante el ejercicio, permitiendo un análisis detallado de la biomecánica involucrada. Cada ángulo fue monitoreado utilizando la aplicación móvil y los datos fueron registrados para proporcionar retroalimentación precisa sobre la ejecución de los movimientos, asegurando que los ejercicios se realizaran correctamente y dentro del rango adecuado.



A) B)

Figura 16. A) Posición inicial en 0°, B) Elevación a ángulo ingresado de 90°.

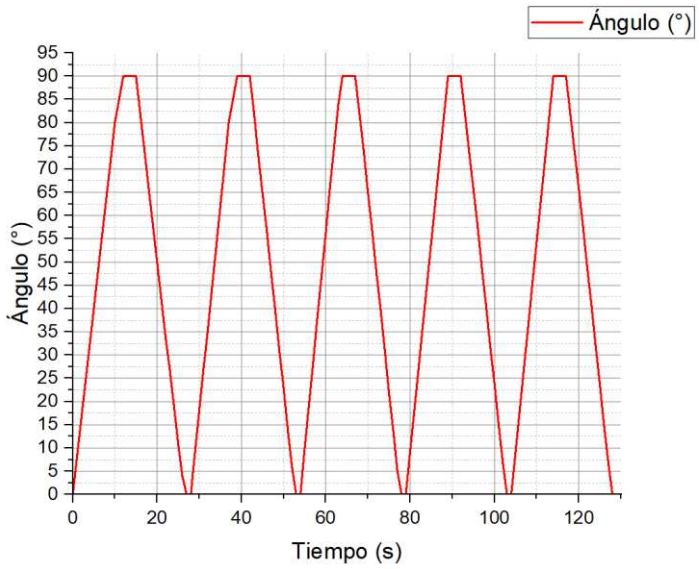


Figura 17. Gráfica de datos registrados a 90°.

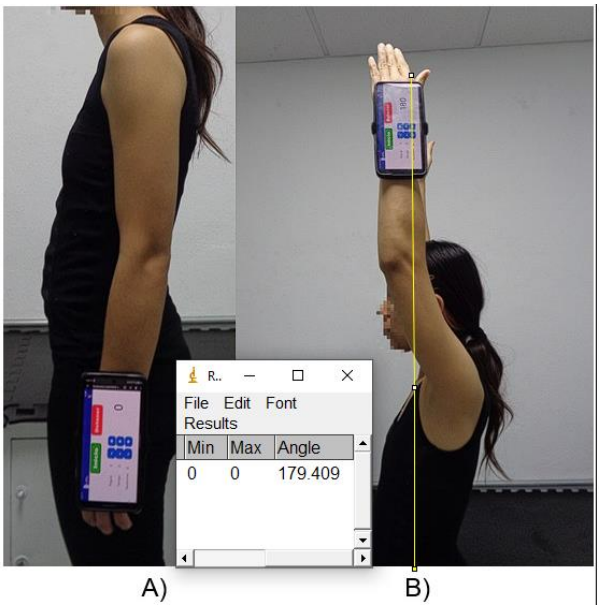


Figura 18. A) Posición inicial en 0°, B) Elevación a ángulo ingresado de 180°.

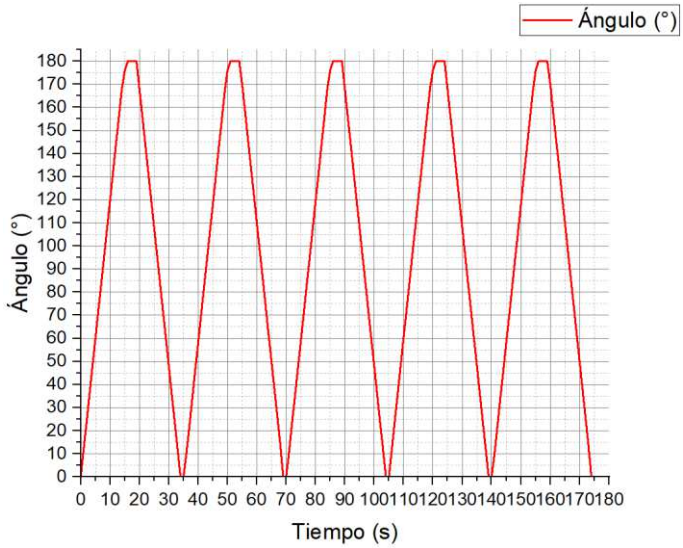


Figura 19. Gráfica de datos registrados a 180°.

2. Ejercicio levantamiento pélvico tipo puente.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 42, pp. 594 - 611.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

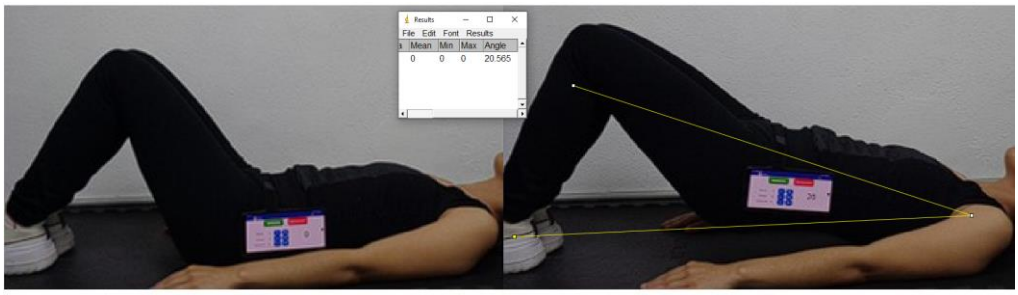


Figura 20. A) Posición inicial en 0°, B) Elevación a ángulo ingresado de 20°.

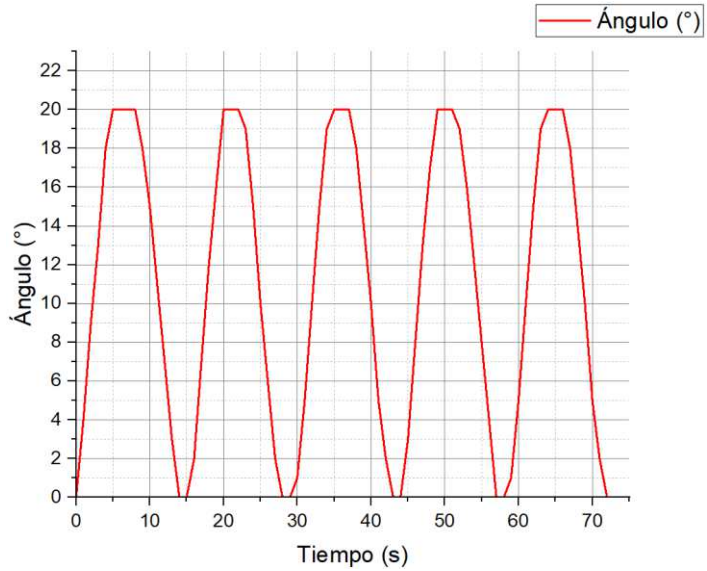


Figura 21. Gráfica de datos registrados a 20°.

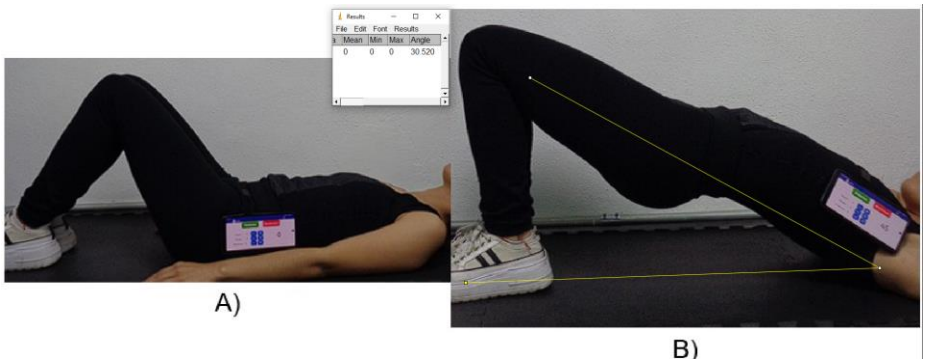


Figura 22. A) Posición inicial en 0°, B) Elevación a ángulo ingresado de 30°.

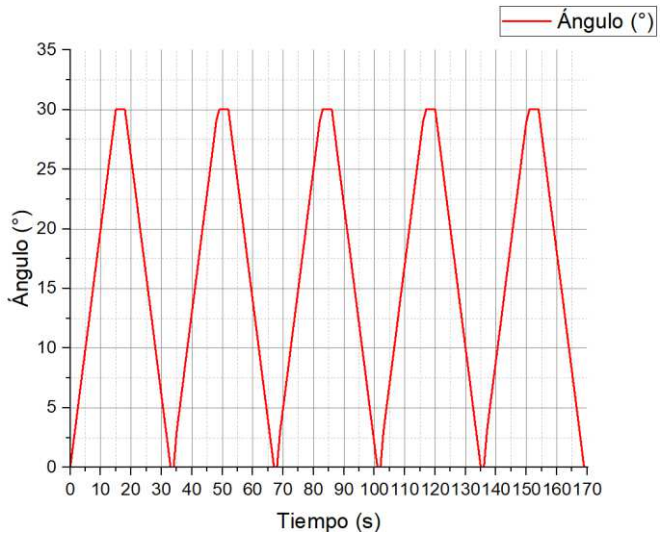


Figura 23. Gráfica de datos registrados a 30°.

5. Conclusiones

En conclusión, este trabajo demuestra la integración efectiva de la mecatrónica médica en el campo de la rehabilitación física mediante el desarrollo de una aplicación móvil para la medición de ángulos biomecánicos. Utilizando la IMU de un smartphone y una Raspberry Pico W con conectividad Bluetooth Low Energy, se ha logrado diseñar un sistema que permite el monitoreo y almacenamiento inalámbrico de datos durante la ejecución de ejercicios terapéuticos en casa. La validación del sistema, basada en la comparación con técnicas de procesamiento de imágenes, confirma su precisión y fiabilidad. Además, los resultados indican que este tipo de herramientas tecnológicas promueven la adherencia a las terapias y proporcionan retroalimentación inmediata, mejorando la efectividad del tratamiento en entornos no clínicos.

6. Referencias

[1] Laffont, I., Bakhti, K., Coroian, F., van Dokkum, L., Mottet, D., Schweighofer, N., & Froger, J. (2014). *"Innovative technologies applied to sensorimotor rehabilitation after stroke"*. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, *57*(8), 543–551. https://doi.org/10.1016/j.rehab.2014.08.007

[2] Knezevic, N. N., Candido, K. D., Vlaeyen, J. W. S., Van Zundert, J., & Cohen, S. P. (2021). "*Low back pain"*. *Lancet*, *398*(10294), 78–92. https://doi.org/10.1016/s0140-6736(21)00733-9

[3] Gluppe S, Ellström M, Bo K. *"Immediate Effect of Abdominal and Pelvic Floor Muscle Exercises on Interrecti Distance in Women With Diastasis Recti Abdominis Who Were Parous". Women's Health.* Phys Ther. 2020 Aug 12;100(8):1372-1383. doi: 10.1093/ptj/pzaa070. PMID: 32302393.

[4] Pleguezuelos, E., & Miravitlles, M. (2019). "*Rehabilitación pulmonar… sí pero no"*. *Archivos de bronconeumologia*, 55(12), 617–618. https://doi.org/10.1016/j.arbres.2019.07.018.

[5] Liu, Y.-H., Moratal, D., Escudero, J., & Huang, H.-P. (2018). "*Medical mechatronics for healthcare. Journal of Healthcare Engineering"*, 2018, 1–3. https://doi.org/10.1155/2018/9675482.

[6] Willingham, T. B., Stowell, J., Collier, G., & Backus, D. "*Leveraging emerging technologies to expand accessibility and improve precision in rehabilitation and exercise for people with disabilities". International Journal of Environmental Research and Public Health*, (2024), 21(1), 79. https://doi.org/10.3390/ijerph21010079.

[7] Guo, Y., He, M., Tong, X., Zhang, M., & Huang, L. (2024). "*Research on the motion control strategy of a lower-limb exoskeleton rehabilitation robot using the Twin Delayed Deep Deterministic policy gradient algorithm"*. Sensors (Basel, Switzerland), 24(18), (2024), 6014. https://doi.org/10.3390/s24186014.

[8] Nnodim, C. T., Arowolo, M. O., Agboola, B. D., Ogundokun, R. O., & Abiodun, M. K. "*Future trends in mechatronics"*. International Journal of Robotics and Automation (IJRA), 10(1), 24. https://doi.org/10.11591/ijra.v10i1.pp24-31, (2021)

[9] Giggins O., McCarthy U., Caulfield B. *"Biofeedback in rehabilitation"*, *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. **10**, 60 (2013). https://doi.org/10.1186/1743-0003-10-60

[10] Pinheiro, C., Figueiredo, J., Cerqueira, J., & Santos, C. P. "*Robotic biofeedback for post-stroke gait rehabilitation: A scoping review"*. *Sensors* (Basel, Switzerland), 22(19), 7197. (2022) https://doi.org/10.3390/s22197197.

[11] Tarantino, C. (s/f). "*Ejercicio de tonificación de puente básico para una espalda sana"*. *FisioOnline*. 2024, de https://www.fisioterapia-online.com/videos/ejercicio-de-tonificacion-de-puente-basico-para-una-espalda-sana.

[12] McCarthy B, Casey D, Devane D, Murphy K, Murphy E, Lacasse Y. *"Pulmonary rehabilitation for chronic obstructive pulmonary disease"*. *Cochrane Database of Systematic Reviews* 2015, Issue 2. Art. No.: CD003793. DOI: 10.1002/14651858.

[13] Chuang, L.-L., Chen, Y.-L., Chen, C.-C., Li, Y.-C., Wong, A. M.-K., Hsu, A.-L., & Chang, Y.-J. (2017). "*Effect of EMG-triggered neuromuscular electrical stimulation with bilateral arm training on hemiplegic shoulder pain and arm function after stroke: a randomized controlled trial"*. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 14(1). https://doi.org/10.1186/s12984-017-0332-0.

[14] Wang, Q., Hunter, S., Lee, R. L.-T., & Chan, S. W.-C. (2023). "*The effectiveness of a mobile application-based programme for rehabilitation after total hip or knee arthroplasty: A randomised controlled trial"*. *International Journal of Nursing Studies*, 140(104455), 104455. https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2023.104455.

[15] Bruschetta, R., Latella, D., Formica, C., Campisi, S., Failla, C., Marino, F., Iacono Isidoro, S., Giambò, F. M., Bonanno, L., Cerasa, A., Quartarone, A., Marino, S., Pioggia, G., Calabrò, R. S., & Tartarisco, G. (2024). "*"BrainHeart": Pilot study on a novel application for elderly well-being based on mindfulness acceptance and commitment therapy. Bioengineering"* (Basel, Switzerland), 11(8), 787. https://doi.org/10.3390/bioengineering11080787.

[16] Nussbaum, R., Kelly, C., Quinby, E., Mac, A., Parmanto, B., & Dicianno, B. E. (2019*). "Systematic review of mobile health applications in rehabilitation"*. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 100(1), 115–127. https://doi.org/10.1016/j.apmr.2018.07.439.

[17] Milosevic, B., Leardini, A., & Farella, E. (2020). "*Kinect and wearable inertial sensors for motor rehabilitation programs at home: state of the art and an experimental comparison"*. *Biomedical Engineering Online*, 19(1). https://doi.org/10.1186/s12938-020-00762-7.

[18] Sun, T., Li, H., Liu, Q., Duan, L., Li, M., Wang, C., Liu, Q., Li, W., Shang, W., Wu, Z., & Wang, Y. (2017). "*Inertial sensor-based motion analysis of lower limbs for rehabilitation treatments"*. *Journal of Healthcare Engineering*, 2017, 1–11. https://doi.org/10.1155/2017/1949170.

[19] Longhi, M., Merlo, A., Giannotti, E., Giacobbi, M., Mancini, A., Ottaviani, M., Montanari, L., Masiero, S., Prati, P., & Mazzoli, D. (2014). "*Validation of instrumental indices for the upper limb function assessment in neurological patients"*. *Gait & Posture, 40*, S17–S18. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.05.041.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 43, pp. 612 - 622.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Algoritmo para Procesamiento Auditivo de Pacientes con Hipoacusia en MATLAB

Díaz Carvajal Moisés Gustavo[1], Mateo Juárez Jorge[1], Palma Asunción Adilene[1],

Sinuhé Ginés Palestino[1]

[1] Universidad Tecnológico Bilingüe Internacional y Sustentable de Puebla
adilene-asuncion@utbispuebla.edu.mx

Resumen

Con el desarrollo de la tecnología para reproducción de audio se ha potenciado a gran escala la aparición de hipoacusia en la población joven. La hipoacusia inducida por el ruido excesivo es una de las principales causas de pérdida de la audición que se puede prevenir. Este trabajo se aborda la aplicación de la audiometría como prueba para detección de hipoacusia en pacientes con cuadro clínico de leve a moderado. La utilidad de la audiometría a bajas y altas frecuencias permite la detección de cinco niveles de la pérdida de la audición dictaminados por un rango de frecuencia. La ventaja de la audiometría respecto a otros estudios es que no es invasivo al paciente y por lo tanto indolora. El algoritmo para el tratamiento de señales de frecuencia induce un ruido blanco Gaussiano y posteriormente filtra la señal con filtros FIR a diferentes valores de frecuencia. Los resultados experimentales con datos sintéticos permiten determinar una valoración económica tipo audiometría tonal para pacientes de regiones donde no existen clínicas especializadas.

Palabras clave: Hipoacusia, algoritmo auxiliar en audición, MATLAB®, filtro FIR, frecuencias de sonido, ruido blanco gaussiano, audiometría.

1. Introducción

La hipoacusia o discapacidad auditiva es una condición que se presenta en la población a nivel mundial. En los Estados Unidos Mexicanos la prevalencia, según datos del INEGI al 2020, se tiene un total de 4,250,910 personas con discapacidad o limitación auditiva y requieren de un aparato auditivo para poder oír [1]. La pérdida de audición en un grado suficiente afecta la calidad de vida en las actividades cotidianas, ya que se interfiere en la comunicación social y laboral. La hipoacusia o discapacidad auditiva es uno de los padecimientos más comunes en la población a nivel mundial [2].

La identificación en los jóvenes y adultos de la pérdida auditiva, es por zumbido en los oídos o directamente la disminución auditiva gradual comunicada por el paciente. La evaluación diagnóstica incluye pruebas genéticas en conjunto con la revisión del historial de la pérdida gradual de la audición, antecedentes familiares de falta auditiva, exámenes físicos, la

evaluación de la función vestibular, exámenes de imagen del oído y pruebas de audiometría, por mencionar algunas.

Los tipos de estudios de audición por audiometría, corresponden a una prueba de audición indolora y no invasiva que mide la capacidad de una persona para escuchar diferentes sonidos, tonos o frecuencias. Para el funcionamiento de las pruebas de audición por audiometría se tiene que el oído visto en tres partes: el oído externo, el medio y el interno figura 1. En el oído externo recoge las ondas sonoras del entorno y las canaliza por el canal auditivo hasta el tímpano. Cuando el sonido llega al tímpano, se producen vibraciones que son transmitidas a través de unos huesecillos diminutos (huesecillos) en el oído medio. Los huesecillos están formados por el martillo, el yunque y el estribo. El estribo transmite vibraciones a la cóclea en el oído interno. La cóclea es un tubo espiral lleno de líquido y revestido de células ciliadas de tamaño microscópico. Cuando la vibración llega a la cóclea, hace que el líquido y, posteriormente, las células ciliadas se muevan. El movimiento de las células ciliadas genera señales nerviosas que nuestro cerebro interpreta como sonido [5-6].

Las pruebas de audiometría pueden detectar si usted tiene pérdida auditiva neurosensorial (daño en el nervio o la cóclea) o pérdida auditiva conductiva (daño en el tímpano o en los pequeños huesecillos). Durante una evaluación de audiometría, se pueden realizar una variedad de pruebas tonales para determinar el nivel de pérdida de la audición [7-8].

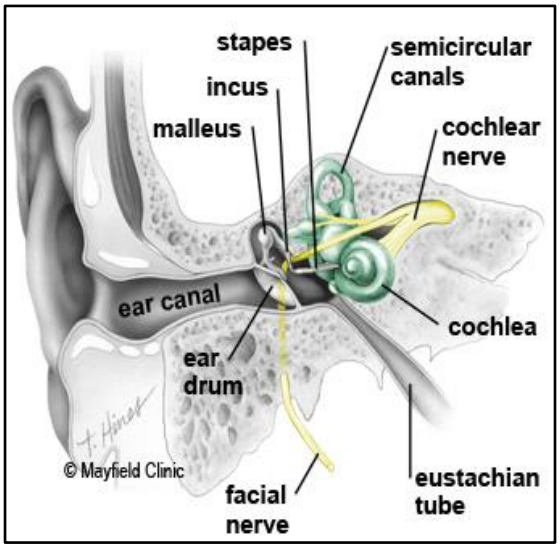


Figura 1. Partes del oído, figura tomada de [3]

2. Pruebas de audición por audiometría

Una prueba de audiometría de tonos puros evalúa el sonido más suave o menos audible que una persona puede detectar [7]. Durante la prueba, generalmente se usan auriculares para reproducir diversas variedades de sonidos dirigidos a un oído a la vez.

La intensidad del sonido se mide en decibeles (dB) para la prueba. Por ejemplo, un susurro tiene aproximadamente 20 dB, la música fuerte oscila entre 80 y 120 dB y un motor a reacción tiene aproximadamente 180 dB.

Cabe precisar que para la prueba el tono del sonido se mide en frecuencias (Hz). Los tonos bajos oscilan entre 50 y 60 Hz, los tonos altos oscilan entre 10 000 Hz o superior.

Se sabe que el rango de audición normal es de 250 a 8000 Hz a 25 dB o menos [10]. Una prueba de discriminación del habla o de reconocimiento de evalúa la capacidad de una persona para comprender el habla a partir del ruido de fondo. Si su capacidad de discriminación del habla es deficiente, el habla puede sonar confusa. Las puntuaciones de reconocimiento de palabras pueden ser útiles para predecir la utilidad de un audífono.

La audiometría de tonos puros representa gráficamente el nivel de audición de diferentes frecuencias tonales en ambos oídos. En un gráfico de audiograma, las **O** rojas indican los resultados del oído derecho y las **X** azules los del oído izquierdo ver figura 2.

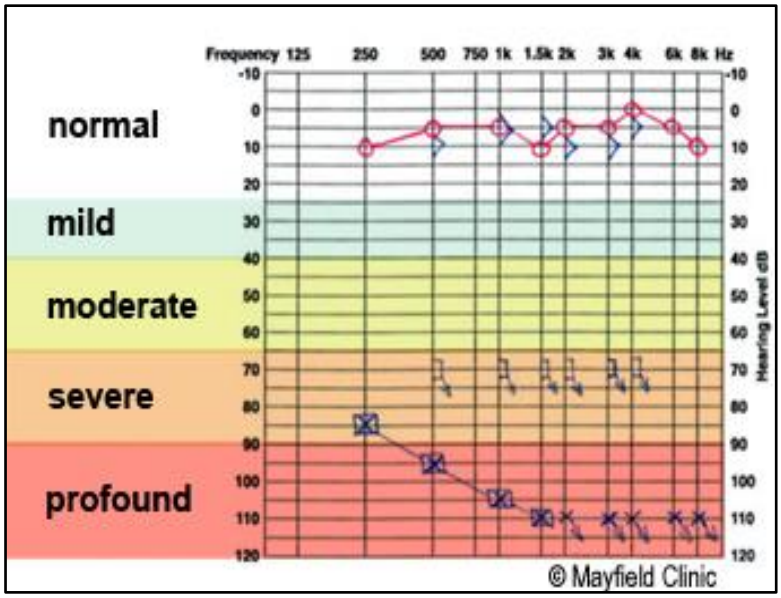


Figura 2. Audiograma de un paciente con neurinoma acústico que muestra pérdida auditiva en el oído izquierdo. La línea roja es el oído derecho. La línea azul es el oído izquierdo, figura tomada de [3].

La pérdida auditiva en el estudio generalmente se describe de la siguiente manera:

- Normal = menos de 25 db HL
- Leve = 25-40 db HL
- Moderado = 41-65 dB HL
- Grave = 66-90 db HL
- Profundo = más de 90 db HL

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 43, pp. 612 - 622.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Idealmente una prueba de audiometría se realiza en una sala silenciosa e insonorizada y se le colocan unos auriculares al paciente en la cabeza. Los auriculares están conectados a una máquina que enviará los tonos y los diferentes sonidos del habla a sus oídos, un oído a la vez. En algunas instalaciones, es posible que le pidan que presione un botón o haga alguna otra señal para indicar que ha reconocido un sonido. El audiólogo registrará cada tono al volumen más bajo posible que haya podido escucharlo [10].

3. Algoritmo para pruebas de audiometría

El alcance de este trabajo es realizar las mediciones tipo audiometría tonal experimentales simulando las señales alcanzadas por el oído con datos sintéticos que permitan determinar el nivel de hipoacusia en cinco niveles. La propuesta está basada en el siguiente diagrama a bloques, figura 3, se compone de una señal sintética con ruido blanco Gaussiano, Filtros FIR, sumador de señal, bloque de cálculo de la transformada rápida de Fourier, base de datos sintéticos y un bloque con el algoritmo para la toma de decisiones.

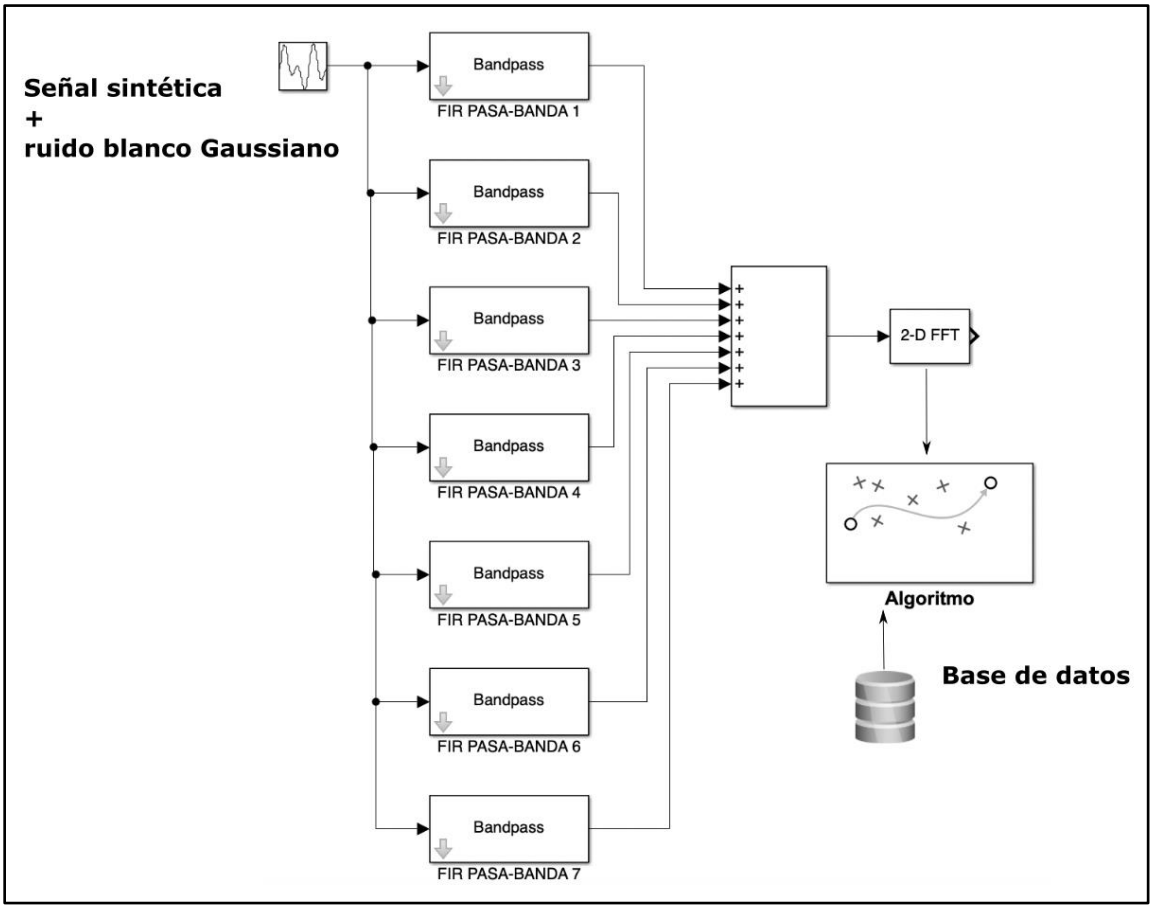


Figura 3. Diagrama a bloques del algoritmo para la valoración de hipoacusia o pérdida auditiva.

El estudio se realiza primero con datos sintéticos para la validación de la metodología propuesta. Para el algoritmo de la evaluación de hipoacusia por audiometría tonal se propone la siguiente forma de señal sintética, la cual tiene la formulación matemática:

$$\sin(2\pi * (125) * t) + \sin(2\pi * (250) * t) + \sin(2\pi * (500) * t) + \sin(2\pi * (1000) * t) + \sin(2\pi * (2000) * t) + \sin(2\pi * (4000) * t) + \sin(2\pi * (8000) * t)$$

La señal de ruido blanco Gaussiano descrita con un generador de números aleatorios con un factor de 0.5:

$$0.5 * \text{randn}(t)$$

Los filtros FIR pasa-banda son orden 100, cuyas frecuencias de corte central están ubicadas en:

- 125Hz,
- 250Hz,
- 500Hz,
- 1kHz,
- 2kHz,
- 4kHz y
- 8kHz,

descrito de la siguiente manera:

$$y[n] = \sum_{k=v}^{M-1} h[k] \cdot x[n-k]$$

Donde:

- $y[n]$ es la salida del filtro en el instante n.
- $x[n]$ es la entrada en el instante n.
- $h[k]$ son los coeficientes del filtro (respuesta al impulso).
- M es el orden del filtro (número de coeficientes).
- k es el índice que recorre los coeficientes del filtro.

La transformada discreta de Fourier (DFT) de una señal discreta $x[n]$ de longitud N está dada por la siguiente ecuación:

$$X[k] = \sum_{n=v}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j2\pi kn/N}, k = 0,1, \dots, N-1$$

Donde:

- $x[n]$ es la señal en el dominio del tiempo.
- $X[k]$ es la señal transformada en el dominio de la frecuencia.
- N es el número de muestras.
- j es la unidad imaginaria.

La transformada rápida de Fourier (FFT) reduce la complejidad computacional de la DFT de $\varphi(N^2)$ a $\varphi(N\ log\ N)$, lo que la hace mucho más rápida, especialmente para señales largas. Esto se logra dividiendo la DFT en partes más pequeñas, aprovechando la periodicidad y simetría de la exponencial compleja. El algoritmo FFT utiliza un enfoque divide y vencerás (divide-and-conquer), donde divide la señal original en señales más pequeñas, computa sus DFT, y luego combina los resultados de manera eficiente [9].

La base de datos está conformada por un conjunto de datos de pacientes sintéticos con la audiometría normal, moderada severa y profunda. La validación de la base de datos se conforma de manera sintética dado la naturaleza de los datos pueden llegar a ser sensibles, además de que se pretende que este *dataset* corto sea el primer paso a la creación de una base de datos completa, que sirva a la clasificación de los niveles de hipoacusia por medio de algoritmos de aprendizaje computacional.

Finalmente, el algoritmo está basado en un árbol de decisión esto permite estructurar adecuadamente los pacientes con el nivel de audición con base a lo que se percibe en la prueba tonal. Las frecuencias se adecuan conforme a lo marcado en las pruebas de audiometría tonal de las clínicas y personal de la salud especializados [10].

3.1 Resultados experimentales

El experimento consiste en simular los procesos que conforman el diagrama a bloques de la figura 3, cada una de las etapas fueron programadas en Matlab, software que permite la creación de programas para simular de manera eficiente señales digitales.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 43, pp. 612 - 622.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Como modelo del algoritmo propuesto en este trabajo se tiene el dato sintético de oído, la señal de ruido generado por números aleatorios, la adición de las señales mencionadas y las señales resultantes por los filtros FIR para las bajas frecuencias.

En la figura 4 se describe a detalle la simulación, con la cual se generaron los resultados experimentales para la detección de niveles de hipoacusia en pacientes, por ejemplo: se observa el resultado del filtro FIR de tono a 125Hz que tiene una ligera disminución en la amplitud y un pequeño cambio de fase en la señal, a partir de esta información se comparará con el banco de datos de señales sintéticas y en consecuencia se puede mejorar debido a la caracterización de personas sanas. Las señales presentadas en la figura no presentan ruido blanco en las frecuencias de 125Hz, 250Hz, 500Hz y 1kHz, esto debido al orden filtro y la selección correcta del ancho de banda del filtro pasa-bandas.

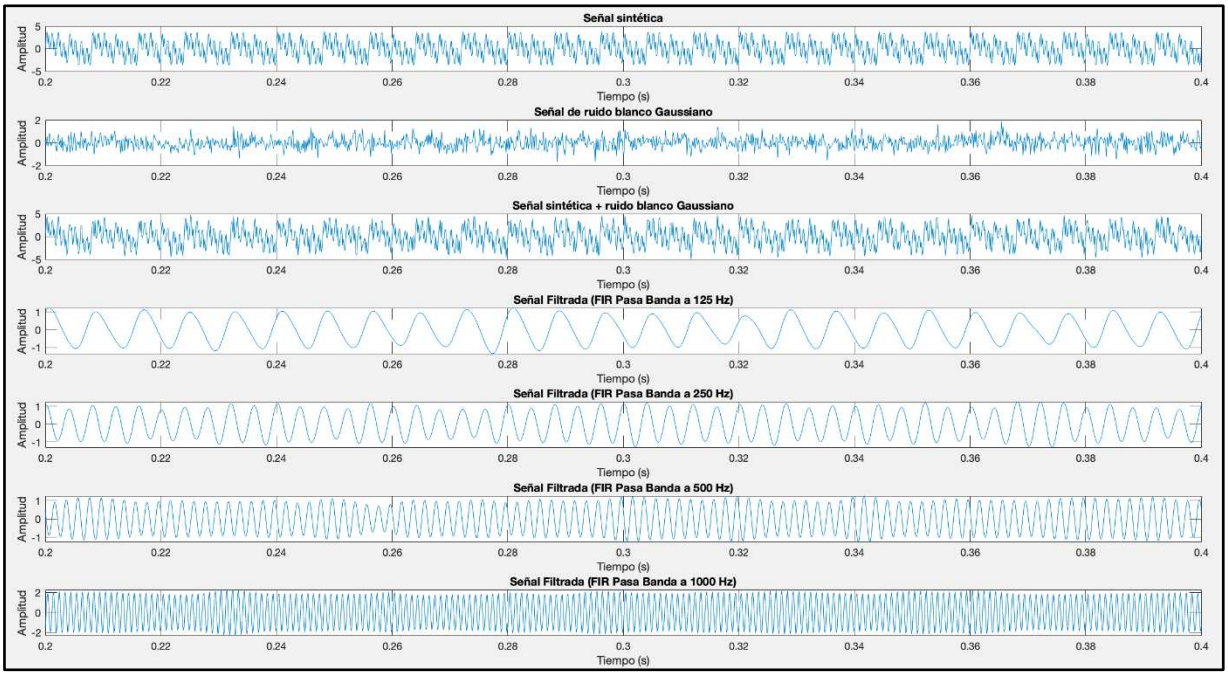


Figura 4. Gráficas de los resultantes de las señales a baja frecuencia.

A continuación, se presenta el espectro de frecuencia de las señales de salida de cada filtro, figura 5.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 43, pp. 612 - 622.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

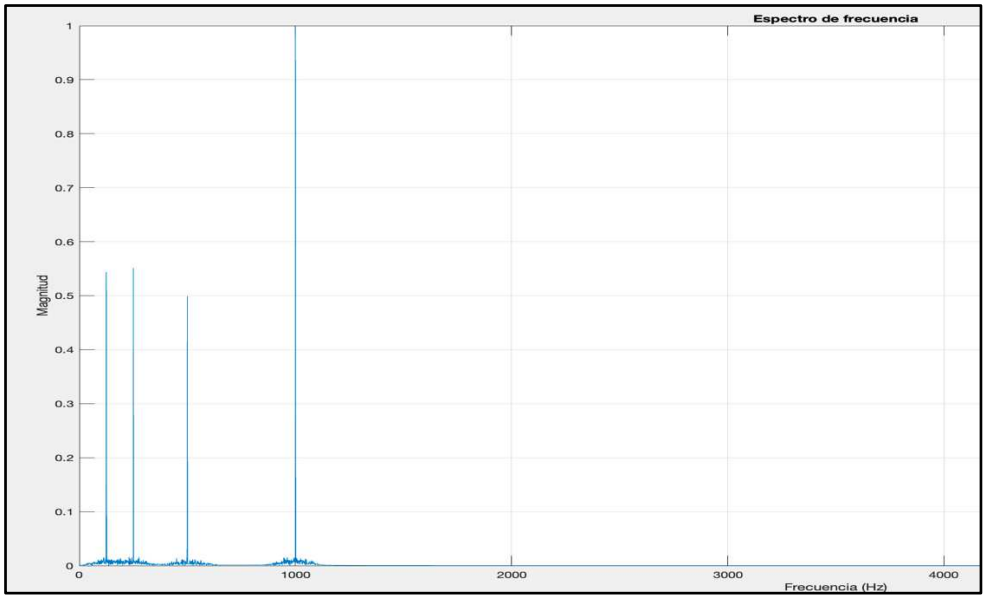


Figura 5. Espectro de frecuencias de las señales a 125Hz, 250Hz, 500Hz y 1kHz.

Finalmente, el algoritmo basado en un árbol de decisión considera el espectro de frecuencia de la señal de origen y la base de señales sintéticas, consecuentemente proporcionara el resultado de la gravedad del paciente.

Este mismo proceso se aplicaría para las señales en alta frecuencia, lo único que se hace énfasis es en seleccionar correctamente la frecuencia de muestreo, en la figura 6.

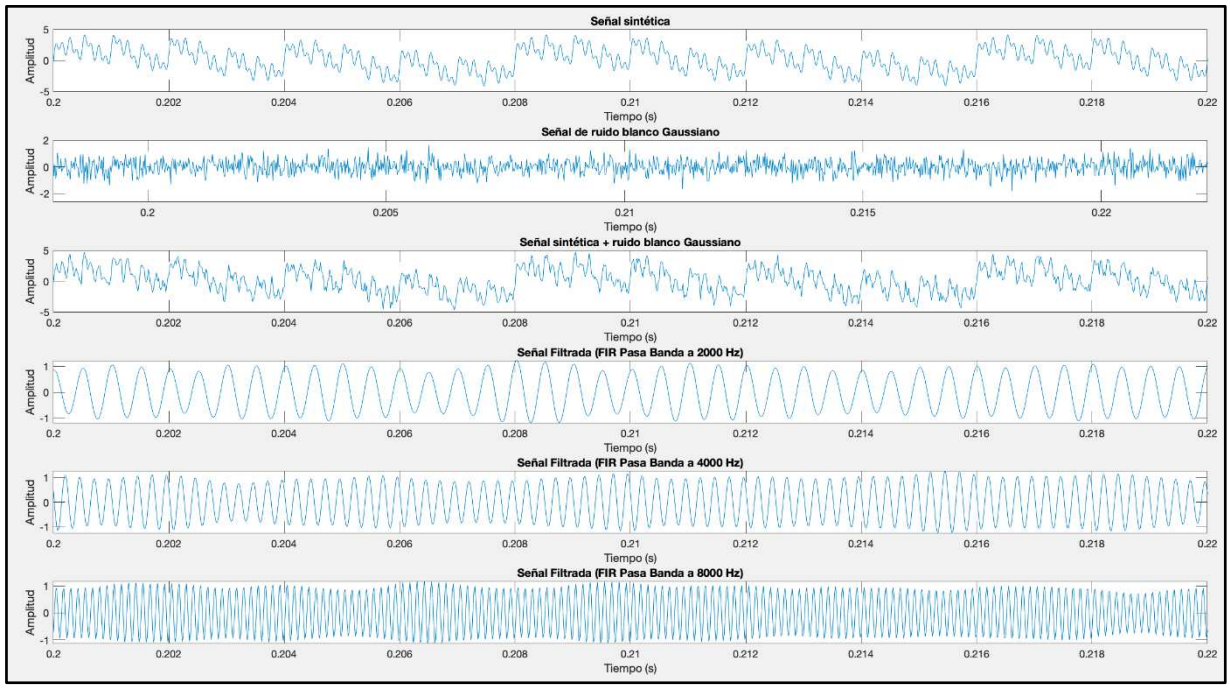


Figura 6. Gráficas de los resultantes de las señales a alta frecuencia.

3.2 Proceso de mejora de tonos de un paciente con la audición baja

Cuando se tiene un estudio de medición auditiva que presenta resultados de pérdida moderada, severa o profunda, en estos casos se pretende mejorar la audición con la adición de bloques, como el presentado en la figura 7. Nuestra propuesta se basa en amplificar los tonos respectivos en función de la medición auditiva; esto es multiplicando a cada tono por una ganancia ($k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ y k_7) que esta correlacionado a medición y al banco de datos muestra de pacientes sanos de todas las edades. Finalmente, los tonos serán amplificados y sumados para la reconstrucción final del audio.

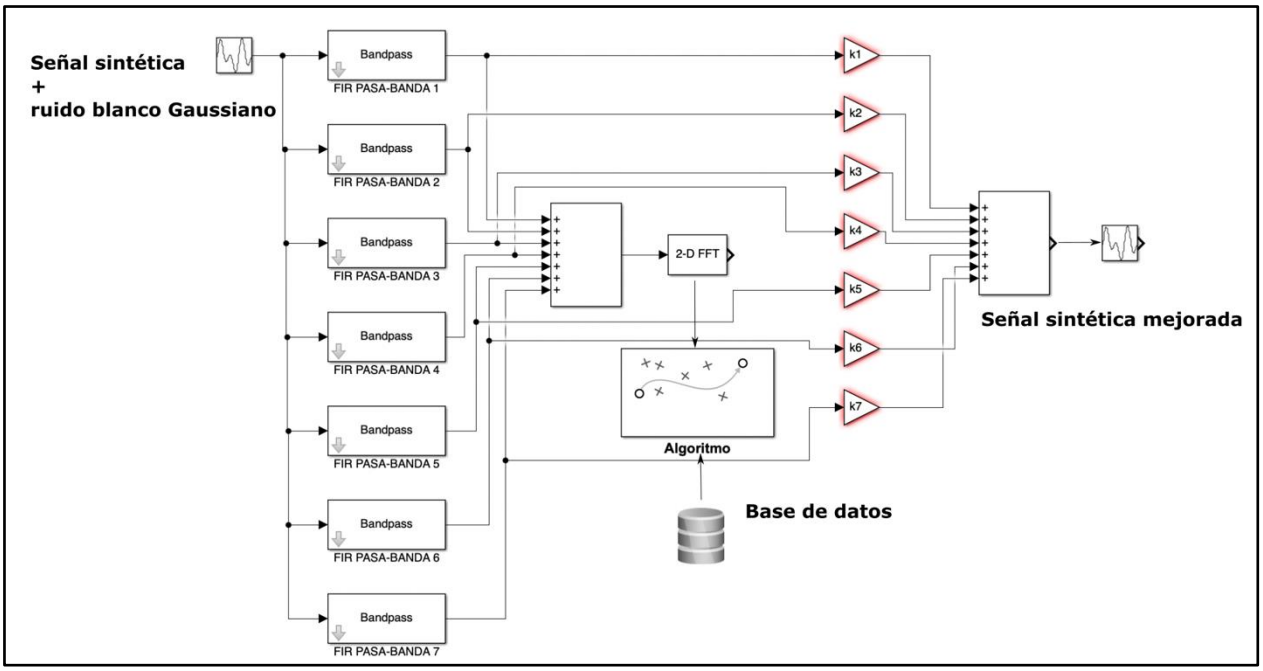


Figura 7. Diagrama a bloques para el mejoramiento auditivo.

4. Conclusiones

Exploración auditiva por la prueba no invasiva por audiometría tonal, permite la validación del nivel de hipoacusia en pacientes jóvenes y adultos. Los resultados experimentales con datos sintéticos permiten tener una primera prueba que se ampliará a la validación de datos de pacientes con algún grado de hipoacusia. En la práctica clínica diaria se deben considerar tanto los umbrales auditivos y la comparación de umbrales obtenidos por

audiometría con el fin de clasificar el nivel de hipoacusia. Este trabajo propone una alternativa para la clasificación de grado de hipoacusia.

A lo largo de este trabajo, se nos ha permitido analizar una heurística para dar solución al diagnóstico para el mejoramiento auditivo. En este trabajo se propusieron algoritmos con alto costo computacional. Una segunda etapa es mejorar el costo computacional mediante la reestructuración del algoritmo propuesto, sin afectar la esencia, los cuales, permitan trabajar en tiempo real.

Como trabajo futuro, se espera la colecta y creación de base de datos para la clasificación automática de los niveles de hipoacusia a pacientes con un cuadro clínico de pérdida de audición. Además de la implementación por medio de una tarjeta de instrumentación para la obtención de un prototipo de pruebas experimentales para evaluaciones en pacientes en tiempo real.

Referencias

[1] Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (2020) “Población con discapacidad o limitación en la actividad cotidiana por entidad federativa y tipo de actividad realiza según sexo, México, 2020”.

[2] Nadol Jr, J. B. (1993). Hearing loss. *New England Journal of Medicine*, *329*(15), 1092-1102.

[3] Mayfield Brain & Spine (2024), Staff, Mayfield Clinic, Cincinnati, Ohio, https://mayfieldclinic.com/pe-hearing.htm.

[4] Ortiz, M. J. G., Núñez, M. M. T., Fortuny, A. T., Muñoz, E. A., & Sánchez, F. C. (2017). Audiometry of high frequencies: usefulness in the audiological diagnosis of hearing-induced hearing loss. Revista Archivo Médico de Camagüey, 21(5), 584-591.

[5] Abdala, C., & Keefe, D. H. (2011). Morphological and functional ear development. In Human auditory development (pp. 19-59). New York, NY: Springer New York.

[6] Wegel, R. L. (1922). The physical characteristics of audition and dynamical analysis of the external ear. Bell System Technical Journal, 1(2), 56-68.

[7] Davies, R. A. (2016). Audiometry and other hearing tests. Handbook of clinical neurology, 137, 157-176.

[8] ATHERLEY, G., & JOHNSTON, N. (1983). Audiometry—the ultimate test of success?. The Annals of occupational hygiene, 27(4), 427-447.

[9] Cooley, J. W., & Tukey, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. Mathematics of computation, 19(90), 297-301.

[10] Swanepoel, D. W., Mngemane, S., Molemong, S., Mkwanazi, H., & Tutshini, S. (2010). Hearing assessment—reliability, accuracy, and efficiency of automated audiometry. Telemedicine and e-Health, 16(5), 557-563.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 44, pp. 623 - 635.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Adaptación del Método Paso a Paso para la Solución de Secuencias Electro Neumáticas en Sistemas Programables

Torres Báez Edgar Armando[1] (✉). Rangel Ramírez Gabriela[1], Flores García Efrén[2] y Uriel Alejandro Luna Ávila[1]

[1]Instituto Tecnológico Superior de San Luis Potosí Capital División de Ingeniería Mecatrónica
[2] Instituto Tecnológico de San Luis Potosí Departamento de eléctrica, electrónica y mecatrónica
edgar.torres@tecsuperiorslp.edu.mx (✉)

Resumen

Actualmente dentro del campo de la automatización existen diferentes procesos que utilizan actuadores neumáticos e hidráulicos. Estos dispositivos, generalmente son usados para realizar tareas del sector industrial, a través de secuencias de movimientos de acuerdo a las necesidades de la aplicación. Generalmente se emplea un método sistemático, que permite analizar e implementar esta serie de movimientos ordenados de los actuadores, utilizando dispositivos programables como lo son PLC´s, entre otros. En el presente trabajo se plantea utilizar la metodología paso a paso y realizar su adaptación con funciones lógicas básicas, a través de la implementación de un estudio de caso.

Palabras clave: Método paso a paso, automatización, actuadores, secuencial.

Abstract

Currently within the field of automation there are different processes that use pneumatic and hydraulic actuators. These devices are generally used to perform tasks in the industrial sector, through sequences of movements according to the needs of the application. A systematic method is generally used, which allows analyzing and implementing this series of ordered movements of the actuators, using programmable devices such as PLCs, among others. In this work, it is proposed to use the step-by-step methodology and adapt it with basic logical functions, through the implementation of a case study.

Keywords: Step-by-step method, automation, actuators, sequential.

1. Introducción

Uno de los principales actuadores usados en el sector industrial, son los cilindros de simple efecto y de doble efecto tanto neumáticos como hidráulicos, los cuales se utilizan para realizar movimientos lineales para automatizar procesos, estos actuadores son controlados con electroválvulas. Una de las aplicaciones típicas son la creación de movimientos secuenciales entre varios cilindros, estas secuencias son programadas generalmente con dispositivos como PLC's para formar un sistema semiautomático y/o automático [1].

Para dar solución a estos sistemas que requieren una secuencia de movimientos, se utilizan técnicas que permiten realizar el análisis de una forma sistemática y su implementación resulta muy sencilla. Al ser una metodología existe una serie de pasos que al seguirlos se puede garantizar el óptimo funcionamiento del sistema.

Generalmente una de las técnicas utilizadas es el método paso a paso y el método cascada, su principal implementación es a través de dispositivos lógicos programables PLC´s o a través de la lógica cableada (mediante relevadores). La ventaja de usar estos dispositivos, es que ambos basan su funcionamiento en los diagramas escalera (Ladder), lo cual facilita su adaptación entre ambos sistemas, a partir de un mismo análisis.

La ventaja de tener un diagrama escalera, es que este puede tener una adaptación o equivalencia a través de funciones lógicas básicas (AND, OR y NOT), como todos los lenguajes de programación ya tienen estas herramientas, prácticamente el método se puede aplicar a cualquier dispositivo tomando como referencia el lenguaje Ladder [2].

En la actualidad las necesidades del sector industrial, requieren que las instituciones educativas proporcionen a los estudiantes las competencias y habilidades necesarias para al momento de egresar tengan la capacidad y habilidad de generar un análisis crítico, que le permita abordar, diseñar, implementar y valorar soluciones a problemas de automatización.

Por esta razón, dentro de las instituciones educativas de nivel superior, el proceso de enseñanza aprendizaje, se trabaja bajo un esquema teórico práctico, empleando estrategias didácticas como lo es el estudio de casos, problemas de aplicación y prácticas de laboratorio, las cuales se llevan a cabo mediante laboratorios virtuales o usando equipo físico.

Para aplicar de manera eficiente estas estrategias de aprendizaje, el catedrático, se encarga de generar los ambientes de aprendizaje adecuados y proporcionar el conocimiento de ciertas metodologías (como el método paso a paso) que le permitirán dar la solución a sistemas de automatismos, la necesidad de aplicar de manera oportuna estos métodos, es que al tener un análisis objetivo del sistema, se puede aplicar estas técnicas garantizando tener mínimo de errores en la implementación asegurando su funcionabilidad adicional permite tener la facilidad de realizar una readaptación del proceso si las necesidades así lo requieren.

En este trabajo se explica cómo se implementa la metodología paso a paso a una aplicación típica utilizada en la industria y a partir de su implementación se expone el proceso de adaptación y equivalencia en funciones lógicas.

2. Análisis de la metodología

El método en el cual se basa este documento es cualitativo, ya que consiste en una serie de pasos que dan la solución a una secuencia de movimientos de actuadores neumáticos y/o hidráulicos, los pasos para dar la solución al sistema son los siguientes [3]:

1. Determinar cuántos actuadores hay en el proceso y nombrarlos con letras mayúsculas.
2. Establecer el orden y la secuencia de operaciones que se realizan en el proceso, de acuerdo al plano de situación [4].
3. Realizar el diagrama espacio fase.
4. Obtener la ecuación de movimiento, indicando el nombre del actuador acompañado de un signo (+) cuando se trata de un avance y de un signo (–) cuando se trata de un retroceso.
5. Agrupar la ecuación de movimiento en un **mínimo de tres grupos**.
6. Asegurar que los grupos incluyan la mayor cantidad de movimientos, con la única restricción que, **dentro de un grupo, no se debe repetir movimiento de un mismo actuador**.
7. Para el diagrama neumático y/o hidráulico, si los cilindros si son de doble efecto, considerar electroválvulas de control 5/2, para cada uno de ellos, y nombrar el solenoide con la letra “Y”, continuar una numeración consecutiva.
8. Considerar un par de sensores finales de carrera para cada cilindro, tanto para detectar el avance y retroceso del vástago, etiquetarlo con la letra “S”, estos sensores se van a numerar de forma consecutiva.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 44, pp. 623 - 635.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

9. Dentro de la ecuación de movimientos, asignar los sensores finales de carrera, considerando que son los elementos que dan origen a generar los movimientos y los cambios de grupo. Tomar en cuenta lo siguiente:
    a. Los sensores finales de carrera que realizan el cambio de grupo se ubican sobre las líneas verticales que separan cada grupo en la ecuación.
    b. Los sensores que generan movimiento dentro de un grupo, se ubican en la parte inferior y/o superior de la ecuación de movimiento.
    c. El sensor final de carrera que cicla la secuencia, es el que se ubica en la parte inferior de toda la ecuación de movimientos.
10. Para formar el diagrama escalera (Ladder) se divide en dos etapas principales control y potencia:
    a. Para la etapa de control se asigna un relevador por cada uno de los grupos más uno, y conectar como se muestra en la siguiente figura, etiquetando los relevadores con la letra “K” y el numero corresponderá al grupo actual (1,2, 3, …,n) donde n es el número de grupos:

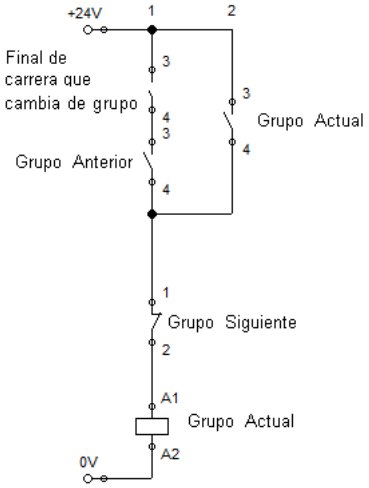


Figura 1. Diagrama escalera (etapa de control)

    b. Para el relevador adicional que se conecta, se considera que en este se integrará el botón de puesta en marcha “START” y el botón de “STOP”, considerando la conexión como se muestra a continuación, el relevador asignado para este sistema es “K0”:

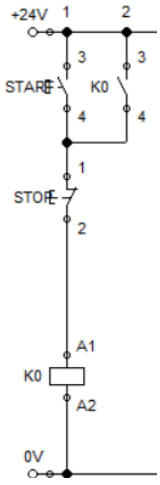


Figura 2. Diagrama escalera (etapa arranque y paro)

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 44, pp. 623 - 635.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

c. Para la etapa de potencia es necesario poner un contacto NA para el grupo actual en serie con el solenoide correspondiente al movimiento a efectuarse en tal grupo, así como los sensores finales de carrera necesarios para realizar el movimiento, si es que se requieren, estos también deben de ir en serie con el contacto del grupo correspondiente, realizar la conexión como se muestra a continuación:

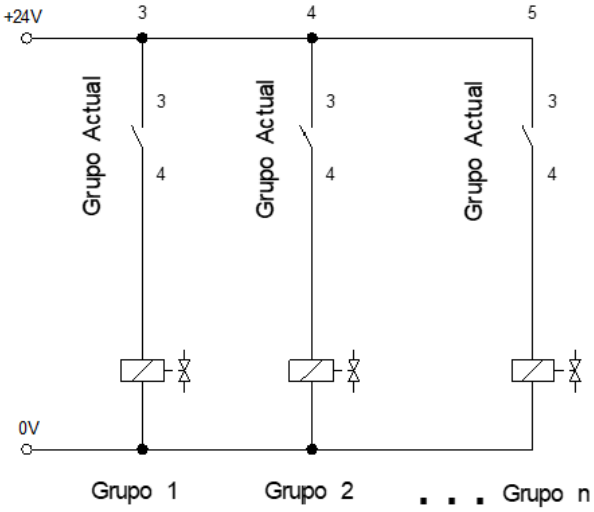


Figura 3. Diagrama escalera (etapa de potencia)

2.1 Implementación del método paso a paso a un proceso industrial mediante electroneumática

Una forma de entender el procedimiento es aplicar esta técnica en un caso típico del sector industrial, el cual consiste en automatizar el siguiente proceso mostrado en la figura 4:

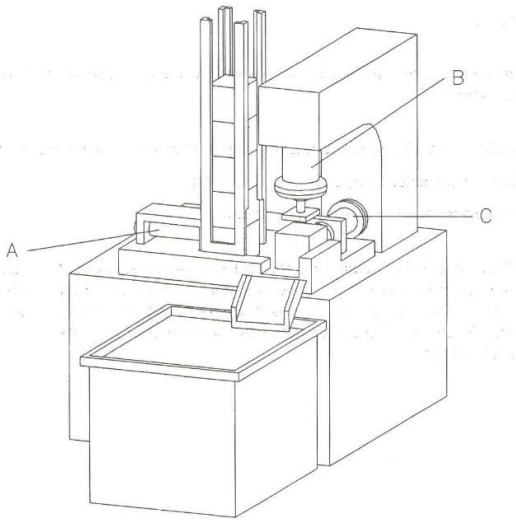


Figura 4. Plano de la situación [5]

El proceso tiene como finalidad realizar el estampado de unas cajas, este consta de 3 cilindros de doble efecto, denotados con las letras A, B y C. La secuencia que se debe seguir es la siguiente:

1. Al accionar un botón de arranque, el cilindro A extiende el vástago para despachar una de las cajas a la zona de estampado.
2. El cilindro B, extiende el vástago para realizar el proceso de estampado.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 44, pp. 623 - 635.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

3. El cilindro B regresa a su posición inicial.
4. El cilindro A regresa a su posición inicial.
5. El cilindro C extiende el vástago, para empujar la caja a zona de embalaje.
6. El cilindro C regresa a su posición inicial.
7. La secuencia vuelve a comenzar.

Siguiendo la metodología, el paso 1 y 2 se cubren dentro de la explicación del funcionamiento del sistema, pues ya se identificó el orden lógico de la secuencia de movimientos que ejecutan los actuadores y se les asigno una etiqueta a cada uno de ellos.

El siguiente paso habla de plantear el diagrama espacio fase, el cual se muestra a continuación:

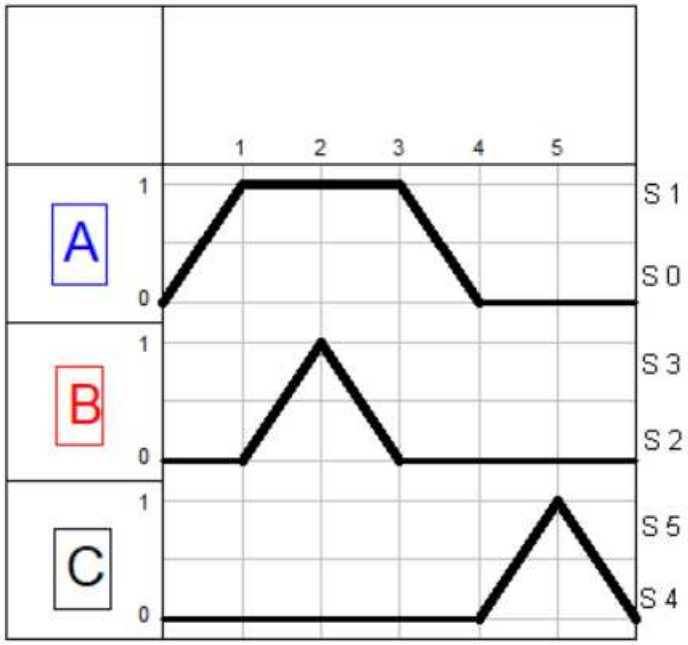


Figura 5. Diagrama espacio fase

Continuando con el procedimiento se plantea la ecuación de movimientos basado en el diagrama espacio fase del paso anterior.

$$A+ \quad B+ \quad B- \quad A- \quad C+ \quad C- \tag{1}$$

Posteriormente en el punto 5 y 6 se agrupa la ecuación de movimientos siguiendo las restricciones que se plantean en la metodología.

	Gpo. I		Gpo. II			Gpo. III
INICIO →	A+	B+	B-	A-	C+	C-

(2)

En el paso 7, indica que deberá realizarse el diagrama neumático y/o hidráulico, considerando electroválvulas 5/2 para el control de cilindros de doble efecto, adicional a ellos, los solenoides de cada válvula se etiquetan con la letra “Y” continuando una numeración consecutiva, tal como se muestra en

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 44, pp. 623 - 635.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

el siguiente diagrama, no olvidar los elementos básicos para el funcionamiento del sistema neumático (compresor y unidad de mantenimiento).

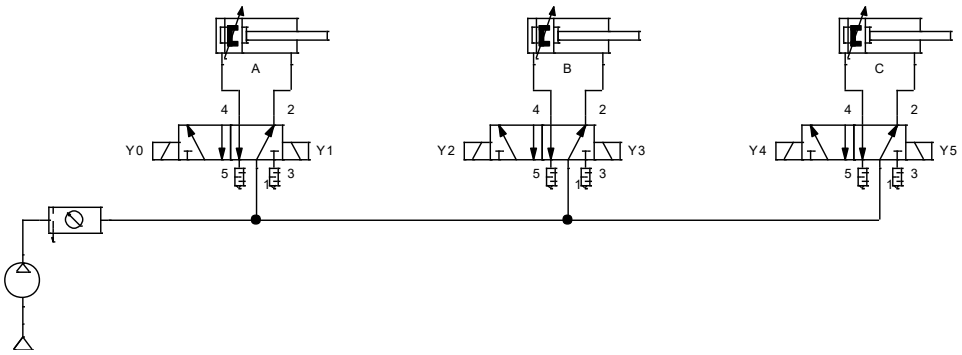


Figura 6. Diagrama neumático con la asignación de etiquetas de los solenoides.

En el paso número 8, se establece asignar sensores finales de carrera para poder detectar el avance y retroceso de cada cilindro, tal como se muestra en la siguiente figura.

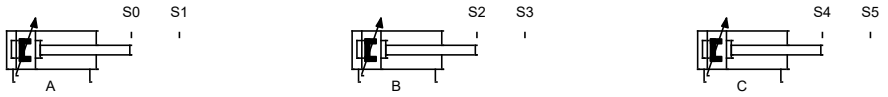
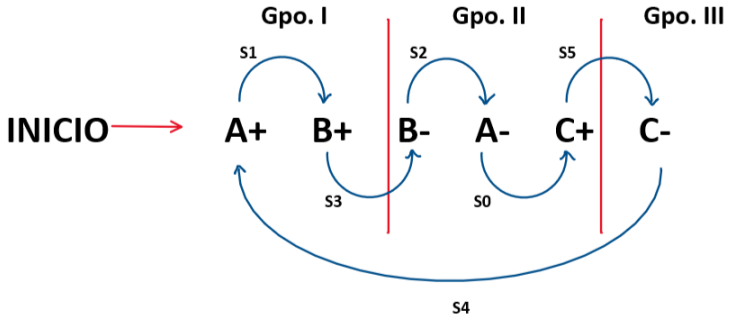


Figura 7. Diagrama neumático con la asignación de etiquetas de los sensores finales de carrera.

Para el siguiente punto, se establece que, dentro de la ecuación de movimientos, se introduzcan los sensores finales de carrera, considerando para este caso, que el final de carrera que hace cambio de grupo es el sensor S3, S5 y S4, siendo este último, el que cicla la secuencia, los demás sensores, son los que generan movimientos dentro del grupo, observar la ecuación 3.



(3)

Siguiendo las especificaciones del último punto se tiene el siguiente esquema eléctrico, mostrado en la figura 8, el segmento marcado con el número 0, es el esquema básico de arranque y paro, los segmentos marcados con los números del 1 al 3 corresponden a la etapa de control y los segmentos marcados con las letras de la A – F corresponden a la etapa de potencia:

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 44, pp. 623 - 635.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

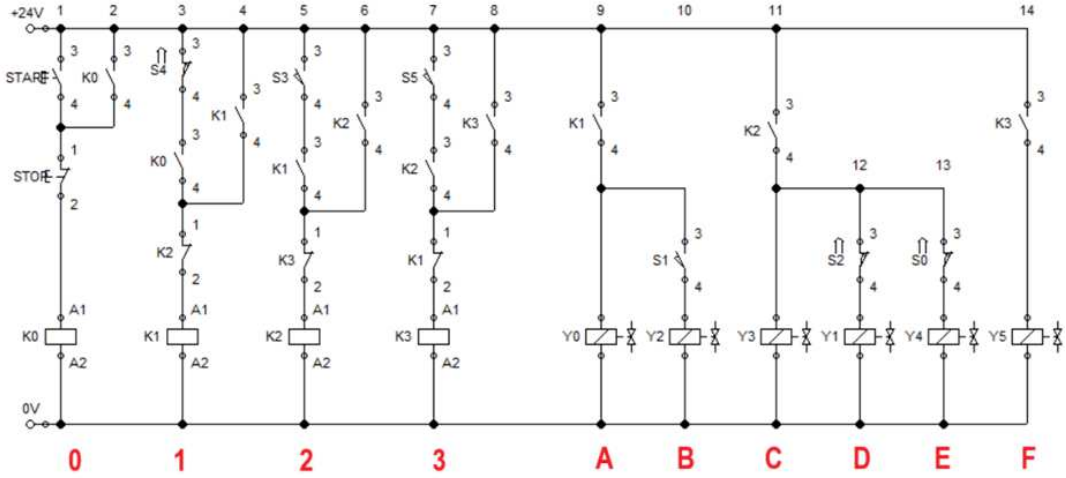


Figura 8. Diagrama eléctrico de la etapa de arranque y paro, control y potencia.

Una vez, concluidos los pasos de toda la metodología se procede a realizar la simulación para validar el resultado y comprobar el funcionamiento de acuerdo a las especificaciones, el video donde se muestra la secuencia completa, está disponible en el siguiente enlace:

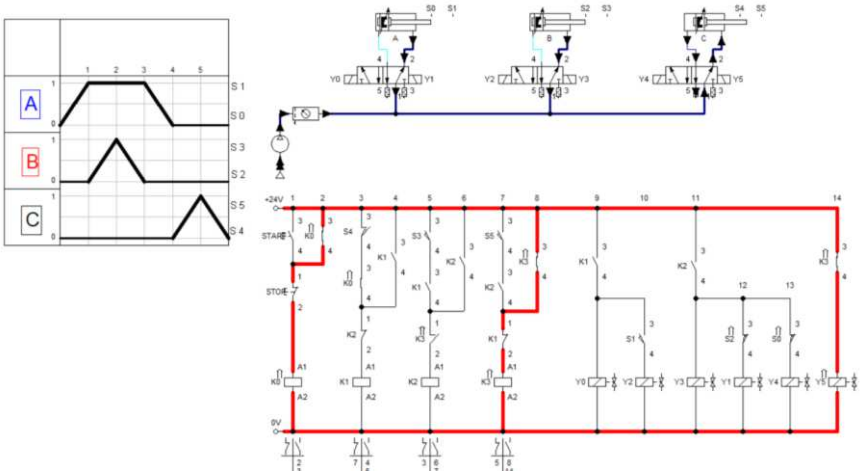


Figura 9. Simulación.

2.2 Adaptación del método paso a paso con funciones lógicas (AND, OR y NOT)

El método paso a paso, se puede adaptar usando funciones lógicas básicas, es decir, la metodología puede ser la misma desde el punto 1 hasta el 9, a partir del paso 10, es donde se realiza la implementación del diagrama escalera para la etapa de control y potencia, y aquí es donde se puede tomar este como base y adaptarlo a lógica booleana, para crear una ecuación estándar, siguiendo las reglas básicas que se enuncian a continuación [6]:

Considerando que la lámpara marcada con la letra “Y” es la salida, y los contactos marcados con la letra A y B respectivamente, corresponden a las entradas del sistema, la conexión de dos contactos normalmente abiertos en serie, corresponde a una función lógica AND, tal como se muestra en la siguiente imagen:

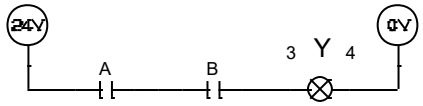


Figura 10. Equivalencia de contactos NO en serie con una función AND.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 44, pp. 623 - 635.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

La ecuación representativa de la función lógica AND, es la mostrada a continuación:

$$Y = AB \tag{4}$$

La conexión de dos contactos en paralelo como se muestra en la siguiente imagen corresponde a una función lógica OR.

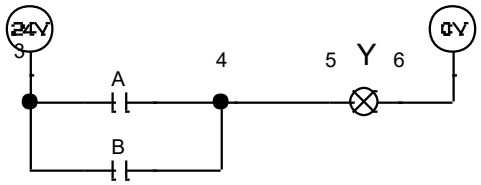


Figura 11. Equivalencia de contactos NO en paralelo con una función OR.

La ecuación representativa de la función lógica OR, es la mostrada a continuación:

$$Y = A + B \tag{5}$$

La equivalencia de una función lógica NOT, es la conexión de un contacto NC, tal como se muestra en la siguiente imagen:

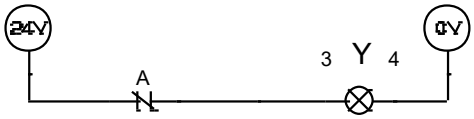


Figura 12. Equivalencia de un contacto NC con una función NOT.

La ecuación representativa de la función lógica NOT, es la mostrada a continuación:

$$Y = \bar{A} \tag{6}$$

Considerando las equivalencias en contactos y la ecuación lógica representativa de cada función, se puede tomar la imagen 8, del paso 10 inciso a, para establecer una ecuación estándar, para qué se pueda replicar, tal como se realizó en ese paso. Para facilidad de la implementación de esta ecuación, los nombres de cada elemento usados en la figura 2, se muestran en la siguiente tabla, con las abreviaturas que se usarán dentro de la ecuación que se va a plantear:

Tabla 1. Abreviaturas de los elementos usados en la figura 2.

Nombre	Abreviatura
Final de carrera que cambia de grupo	FC
Grupo Anterior	GAnt
Grupo Actual	GAct
Grupo Siguiente	GSig
Botón Start	BStart
Botón Stop	BS

Teniendo las abreviaturas correspondientes, se puede realizar el planteamiento de la ecuación 7, la cual se replicará para cada grupo que se generó en la aplicación del método paso a paso.

$$GAct = [(FC * GAnt) + GAct] * (\overline{GSig}) \quad (7)$$

Para el inciso b del paso 10, se puede apreciar que es un esquema típico de arranque y paro, para lo cual la ecuación estándar queda como se muestra a continuación:

$$K0 = [BStart + K0] * (\overline{BS}) \quad (8)$$

Una vez que se tienen las ecuaciones equivalentes estándar del diagrama escalera, se procede a realizar su aplicación en el ejemplo visto en el punto 2 para su demostración, como se menciona en párrafos anteriores la metodología es la mismas del punto 1 al 9, por lo cual ya no es necesario repetirla.

Se tomará el diagrama mostrado en la figura 8, el cual en la parte inferior viene marcado con los números del “0” al “3” y letras de la “A - F”, para su fácil identificación, para realizar la adaptación tomando como referencia las ecuaciones 7 y 8, por lo cual las equivalencias de todo el sistema son las mostradas a continuación:

Para el segmento marcado con el número cero la ecuación es la misma que la número 8, para el segmento que está etiquetado con el número 1, donde se realiza el cambio del grupo 1 al 2, se tiene como resultado lo siguiente:

$$k1 = [(S4 * K0) + K1] * (\overline{K2}) \quad (9)$$

Para el siguiente segmento, donde se realiza el cambio del grupo 2 al 3, la ecuación queda como se muestra a continuación:

$$k2 = [(S3 * K1) + K2] * (\overline{K3}) \quad (10)$$

Para el segmento marcado con el número 3, donde se realiza el cambio del grupo 3 al grupo 1, su ecuación es la siguiente:

$$k3 = [(S5 * K2) + K3] * (\overline{K1}) \quad (11)$$

Dentro de la etapa de potencia se realizan también conexiones de un diagrama escalera, las cuales se encargarán de energizar los solenoides que realizan los accionamientos en las electroválvulas para ejecutar los movimientos de avance y retroceso en los actuadores, para el segmento marcado con la letra A, donde se realiza el movimiento de “A+”, la ecuación es la siguiente:

$$Y0 = K1 \quad (12)$$

Para el segmento B, donde se realiza el movimiento de “B+”, la ecuación queda como se muestra a continuación:

$$Y2 = K1 * S1 \quad (13)$$

Los movimientos de la ecuación 12 y 13, son generados en el grupo 1, Los movimientos de las ecuaciones 14, 15 y 16, son generados en el grupo 2. En el segmento C, donde se realiza el retroceso del cilindro “B”, la ecuación es la siguiente:

$$Y3 = K2 \quad (14)$$

Para el segmento D, donde interviene el contacto del grupo actual y el sensor final de carrera, para generar el movimiento de retroceso del cilindro “A”, la ecuación es la siguiente:

$$Y1 = K2 * S2 \quad (15)$$

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 44, pp. 623 - 635.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Para el segmento E, donde se realiza el movimiento de avance del cilindro “C”, se tiene la siguiente ecuación:

$$Y4 = K2 * S0 \tag{16}$$

Finalmente, el único movimiento que se da en el grupo 3, es el retroceso de “C“, y este se plantea en el segmento F, el cual, tiene como ecuación la siguiente:

$$Y5 = K3 \tag{17}$$

Una vez que se planteó cada una de las ecuaciones, se realiza la simulación en el software Factory IO creando una escena que contiene los 3 actuadores. Adicional se usa la herramienta de Control I/O, para validar los resultados. A modo de comparativo, se tomarán algunas de las ecuaciones expuestas en párrafos anteriores, para validar la adaptación de la metodología, posteriormente se mostrará el resultado final de la implementación completa, así como el resultado de la simulación [7].

Para el caso de la ecuación 8, se tiene la siguiente imagen representando su implementación en la herramienta de Control I/O.

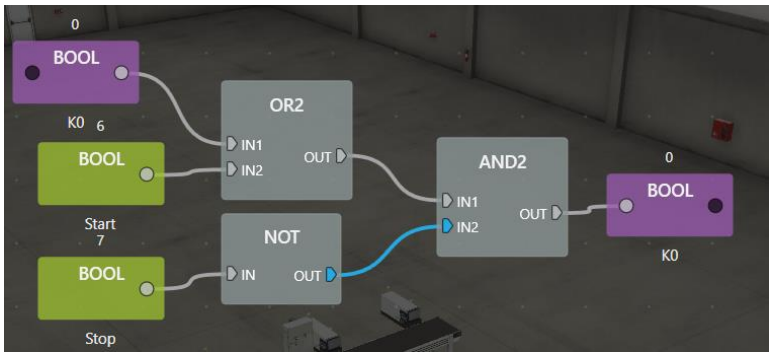


Figura 13. Ecuación 8 implementada con bloques lógicos en el software de Factory IO.

Para la ecuación 9, donde se realiza el cambio del grupo 1 al 2, la implementación en el software es la mostrada en la figura 14.

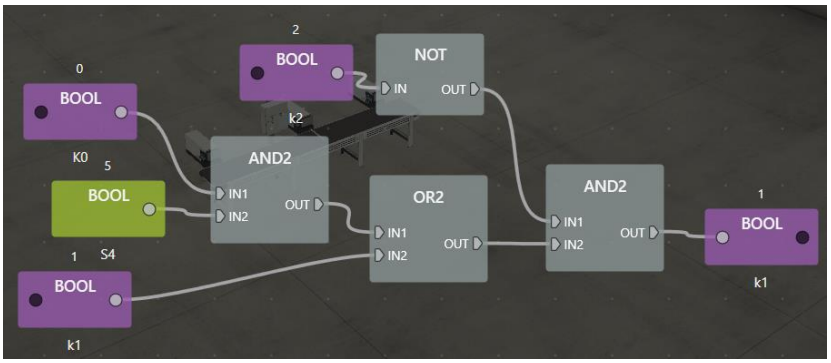


Figura 14. Ecuación 9 implementada con bloques lógicos en el software de Factory IO.

Para la etapa de potencia, se mostrará la implementación en el software de la ecuación 12.

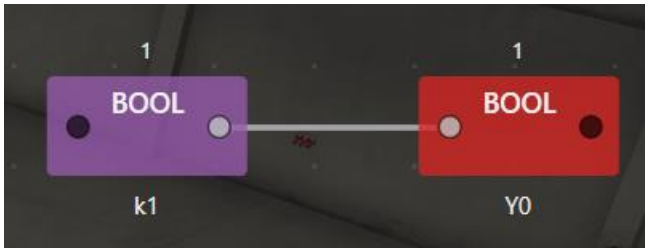


Figura 15. Ecuación 12 implementada con bloques lógicos en el software de Factory IO.

Al concluir la implementación de todas las ecuaciones dentro del software Control I/O, se realiza la escena que contiene los tres actuadores de doble efecto, así como los sensores finales de carrera, el video donde se puede apreciar la simulación completa se encuentra en el siguiente link.

Figura 16. Escena en el software de Factory IO para validar los resultados.

En la figura 17, se muestra la implementación de cada una de las ecuaciones del número 8 a la 17, validando el funcionamiento de esta adaptación de la metodología.

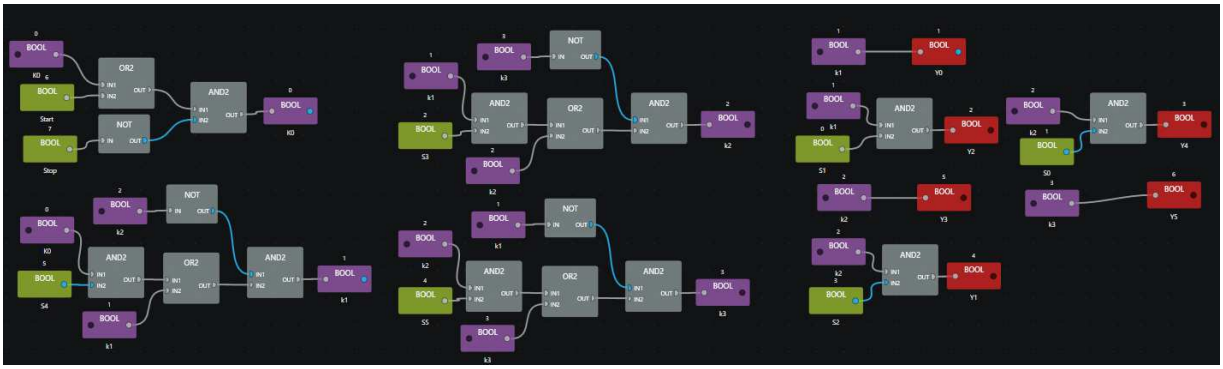


Figura 17. Implementación de todas las ecuaciones número 8 a la 17, en la herramienta Control I/O.

Finalmente, se puede validar que la implementación de esta adaptación es eficiente y realiza el mismo funcionamiento que la metodología utilizada de manera original con electroneumática.

En esta investigación se puede apreciar que gracias a la implementación y uso de diagramas escalera (Ladder), es fácil obtener una ecuación estándar con funciones lógicas básicas. Al tener esta ecuación, se puede aplicar esta metodología, en diversos sistemas programables, como pueden ser microcontroladores, FPGA, LabVIEW, etc. Facilitando la adaptación y aplicación de esta técnica, para la solución de problemas secuenciales, típicos en los ambientes industriales.

Al tener una ecuación estándar con lógica booleana, se facilita también el encontrar y corregir errores dentro del análisis e implementación del sistema.

3. Conclusiones

Dentro de esta investigación se puede apreciar, que el método paso a paso, facilita la implementación de sistemas secuenciales de actuadores neumáticos e hidráulicos, esto permite abordar aplicaciones industriales de esta índole aplicando este mismo análisis, permitiendo una forma estandarizada de dar solución, pero con la posibilidad de no limitarlo a PLC´s o control eléctrico, si no adaptarlo con cualquier dispositivo programable, ya que todos los lenguajes de programación tienen dentro de sus herramientas funciones lógicas, lo cual facilita que al tener una ecuación estándar, se pueda realizar su implementación de manera sencilla, siguiendo los pasos expuestos en este trabajo.

Este método fue el que se seleccionó como ejemplo, pero esto es la base para poder adaptar alguna otra herramienta como el método cascada, cabe resaltar que estos métodos son aplicados principalmente a secuencias con actuadores neumáticos y/o hidráulicos, pero no son limitativas únicamente a estos procesos, ya que la metodología puede migrar a otro tipo de aplicaciones.

Al demostrar que este análisis es válido, este trabajo da pie a generar futuras investigaciones comprobando la aplicación de este método con diversos dispositivos programables, a su vez aplicarlo a diferentes automatismos cuya naturaleza sean sistemas secuenciales.

Por otra parte, en la actualidad, la industria 4.0 demanda el uso de nuevas tecnologías, como el internet industrial de las cosas, inteligencia artificial y el blockchain, solo por mencionar algunas, de esta última tecnología, se puede trabajar en desarrollar sistemas o procesos autónomos implementando las bases del método paso a paso para facilitar la coordinación y la toma de decisiones en tiempo real.

Referencias

[1] Brunete A., S. S. (2024). *Introducción a la automatizacion industrial.* Madrid: Bookdown.
[2] J., B. M. (2010). Metodologías para diseño de circuitos ladder con base en sistemas secuenciales y combinacionales. *Programa de ingeniería eléctrica*, 98-110.
[3] Guerrero A., A. J. (2018). Solución de secuencias neumáticas aplicando el uso del diagrama de espacio fase empleando el método intuitivo. *Innovación y desarrollo tecnológico*, 109-118.
[4] Mendoza J., M. J. (2011). Aplicación del método paso a paso en la solución de problemas de electroneumática. *Scientia Et Technica*, 313-317.
[5] H., R. (1991). *Colección de ejercicios con soluciones nivel avanzado.* Alemania: Festo.
[6] Sánchez O., C. A. (2018). Desarrollo virtual de una rutina con cilindros neumáticos y su comprobación a través del uso de un PLC. *Memorias del Congreso Científico Tecnológico de las carreras de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Industrial y Telecomunicaciones, sistemas y electrónica*, 1-5.
[7] A., C. (2007). *Simulación y control de procesos por ordenador.* España: Marcombo.
[8] Barrientos, A. y. (2014). *Sistemas de producción automatizados.* Madrid : Alfaomega.

[9] Páez H., Z. R. (2015). Programación de Controladores Lógicos (PLC) mediante ladder y lenguaje de Control Estructurado (SCL) en MATLAB. *Revista facultad de ingeniería* , 109-119.
[10] Sanchis R., R. J. (2010). *Automatización industrial.* Castello de Plana: Publicacions de la Universtat Jaume I.
[11] Gutierrez H. (2013). Generación de diagramas ladder mediante el uso de redes de Petri difusas. *Vínculos*, 369-380.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 45, pp. 636 - 649.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Control de Altitud de un InnoSAT Mediante un Regulador Lineal Cuadrático Ajustado por Métodos Heurísticos

García Mejía Juan Fernando[1], Flores Fuentes Allan Antonio[1], Granda Gutierrez Efrén Everdardo[1], García Mejía José Antonio[1] y Reyes Morales Rigoberto[2]

[1]Universidad Autónoma del Estado de México Centro Universitario UAEMex Atlacomulco
Carretera Toluca-Atlacomulco km 60, Atlacomulco México
[2]Agencia Espacial Mexicana Centro Regional de Desarrollo Espacial CREDES Atlacomulco
Parque industrial Santa Rosa, Atlacomulco México
fgarciam@uaemex.mx

Resumen

El Satélite Innovador, conocido como InnoSAT, es un nanosatélite desarrollado por la Agencia Espacial de Malasia (ANGKASA) para llevar a cabo actividades de difusión, investigación y desarrollo tecnológico, como el diseño de reguladores que controlen su comportamiento en el espacio, especialmente en los ejes de balanceo y giro, que según sus funciones de transferencia tienen un comportamiento marginalmente estable y afectan su altitud. una situación que requiere una corrección a través del diseño e implementación de técnicas de control automático como los reguladores lineales cuadrados (LQR), que se diseñan a través de la op-timización de una función de costo utilizando una matriz de ponderación. Aunque esta técnica garantiza la estabilidad del sistema, a menudo se asocia con un alto error cuadrático medio y un tiempo de configuración lento. Esta propuesta presenta una alternativa para mejorar el diseño de reguladores a través de técnicas evolutivas como el Algoritmo Genetico y la Búsqueda del Cuckoo. Estos enfoques reducen los errores y aceleran el tiempo de configuración en los ejes de balanceo y giro InnoSAT.

Palabras clave: Nanosatélites, Regulación de altitud, Algoritmos Genéticos, Busqueda Cuckoo

Abstract

The Innovative Satellite, known as InnoSAT, is a nanosatellite developed by the Malaysian Space Agency (ANGKASA) to carry out dissemination, research and technological development activities, such as the design of regulators that control its behavior in space, especially in the swing and spin axes, which according to their transfer functions have a marginally stable behavior and affect their altitude. a situation that requires a correction through the design and implementation of automatic control techniques such as square linear regulators (LQRs), which are designed through the optimization of a cost function using a weighting matrix. Although this technique ensures system stability, it is often associated with high mean square error and slow setup time. This proposal presents an alternative to improve the design of regulators through evolutionary techniques such as the Genet-ic Algorithm and the Cuckoo Search. These approaches reduce errors and speed up setup time on the InnoSAT swing and swing axes.

Keywords: Nanosatellites, Altitude regulation, Genetic Algorithms, Cuckoo Search

1. Introducción

A finales de la década de los noventa, la Universidad Politécnica de California y la Universidad de Stanford desarrollaron el estándar "CubeSat" para promover el aprendizaje y la exploración espacial, este estándar permite el desarrollo de nanosatélites que tienen un tamaño, costo y tiempos de desarrollo reducidos en comparación con los satélites de tamaño regular, con un peso no mayor a 1 kg [1]. Un

ejemplo es el Satélite Innovador o InnoSat, un proyecto formado por la Universidad Sains Malaysia, la Universiti Teknologi Malaysia y la Universiti Malaysia Perlis, con el objetivo de tomar fotografías de diferentes regiones de Malasia desde órbita baja, almacenarlas y descargarlas una vez que se entra en comunicación con la estación terrestre, sin embargo, también está destinado a probar sistemas de altitud y sensores de paneles solares [2]. El InnoSat conceptualmente está compuesto por 3 CubeSats de dimensiones10x10x10 cm3 en forma de torre con un peso máximo de 1 kg cada uno y un consumo total de energía de 15W, en la Figura 1 se puede ver una representación de un InnoSat. [3].

Figura 1. Esquema de un InnoSat.

Cabe destacar que el comportamiento dinámico de un InnoSAT se modela mediante ecuaciones conocidas como ecuaciones de Euler que pueden transformarse en un conjunto de ecuaciones escritas en términos de la variable compleja s. Esto se muestra en las ecuaciones 1,2,3 [2].

$$\varphi(s) = \frac{s^2 - 0.3023s + 0.8088}{s^4 + 1.1050s^2 + 0.1650} \tag{1}$$

$$\theta(s) = \frac{1}{s^2 - 7.1138\,x\,10^{-3}} \tag{2}$$

$$\phi(s) = \frac{s^2 + 0.3015s + 0.240}{s^4 + 1.1050s^2 + 0.1650} \tag{3}$$

Los InnoSats son susceptibles de ser afectados por perturbaciones ambientales como la gravedad, el viento solar o la radiación, lo que provoca cambios bruscos en su posicionamiento, interfiriendo así en la misión a realizar, especialmente cuando se requiere un alto nivel de precisión, como en el caso de la captura fotográfica [4]. Para compensar el problema, los nanosatélites cuentan con un Sistema de Control de Actitud (ACS), que les permite regular su posición en órbita y compensar las perturbaciones derivadas del entorno.

Una forma de realizar ACS es a través de técnicas clásicas de control como el uso de reguladores tipo PID, esto se muestra en [5], pero tiene algunos inconvenientes como los que se muestran en la Figura 2 para el $\varphi(s)$ eje, que después de cierto tiempo comienza a presentar oscilaciones, al verificar el lugar geométrico de las raíces (Figura 3) es decir, las soluciones del numerador de la ecuación 3, dos de ellas están en el eje imaginario, esto se puede observar en la figura 3 donde se explica este tipo de comportamiento.

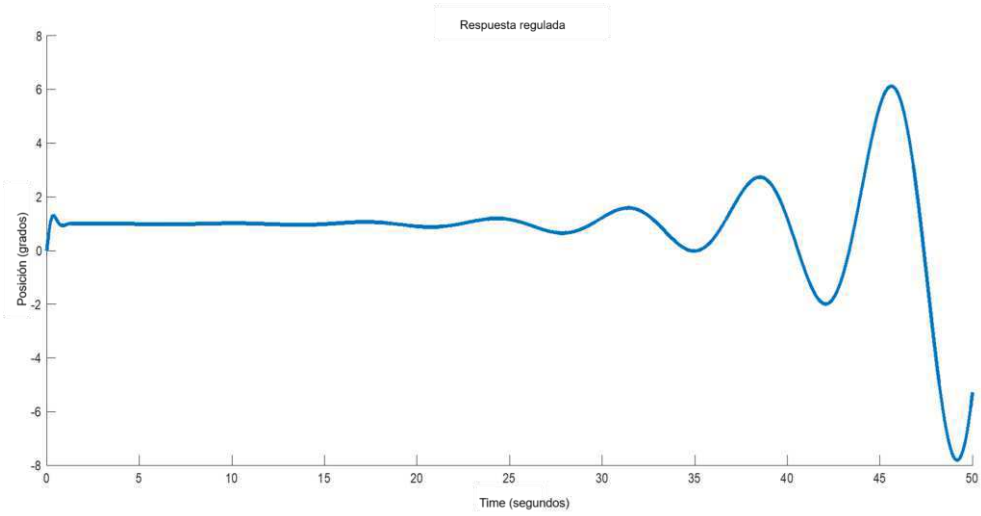


Figura 2. Aplicación de regulación PID a un eje de un InnoSat φ

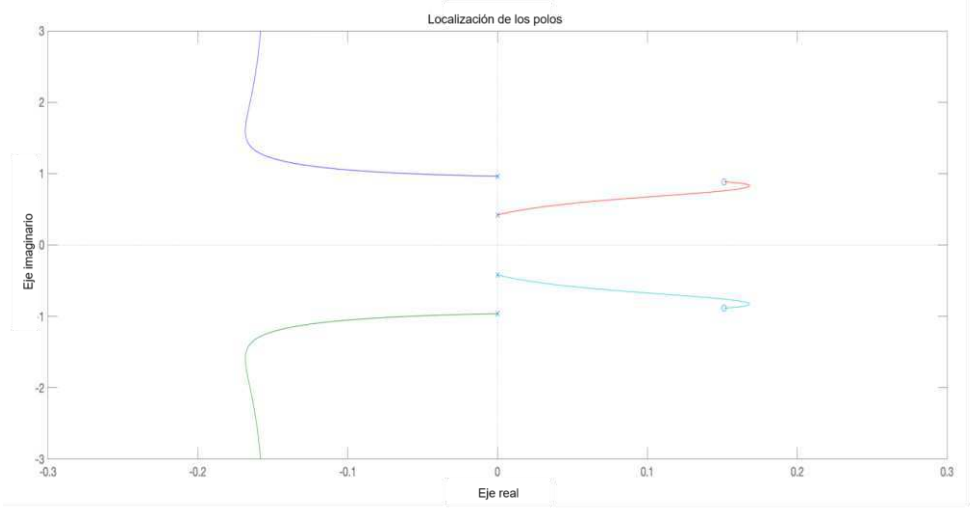


Figura 3. Lugar geométrico de las raices.

La ubicación de los polos de un sistema son determinantes de su comportamiento y por lo tanto condicionan el tipo de técnica de control a implementar, que según la Ingeniería de Control, para sistemas que tienden a la inestabilidad una alternativa pueden ser los reguladores inteligentes o algunas técnicas de control modernas, como es el caso de los Reguladores Cuadráticos Lineales (Linear Quadratic Regulator, LQR, por sus siglas en inglés), que se utilizan en una variedad de aplicaciones de control, incluidas la aeroespacial, la robótica, la ingeniería eléctrica y la mecánica. También se utilizan en sistemas de control de estabilidad, navegación y seguimiento

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 45, pp. 636 - 649.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Para entender un regulador LQR, sea un sistema dinámico definido por variables de estado tal que el vector de estado $\dot{x}$ e definido como $\dot{x} = Ax + Bu$ con una salida y descrita como $y = Cx$ donde $x \in \mathbb{R}^n$ y $u \in \mathbb{R}^m$. A partir de esto, se puede definir una función de costo J la cual puede ser escrita como se muestra en la ecuación 4, por otra parte la ley de control $u(t)$ que permite minimizar la ecuacion 4 se puede escribir como se se describe en la ecuación 5 [6]

$$J = \int_0^\infty [x^T(t)Qx(t) + Ru^T(t)]dt = Cx \tag{4}$$

$$u(t) = -Kx(t) \tag{5}$$

Donde K es calculable por medio de la expresión mostrada en 6 donde P la solución definida positiva única de la ecuación de Riccati definida como $A^TP + AP - PBR^{-1}B^TP + Q = 0$ para $Q = Q^T \geq 0$, ademas de ser una matriz real, simetrica y semidefinida positiva, mientras que la matriz $R = R^T > 0$, es real, simetrica y definida positiva de tal manera que en la Figura 4 se muestra un esquema de regulación de LQR , donde el calculo para K se realiza por medio de la expresión 6 [6]

$$K = R^{-1}B^TP \tag{6}$$

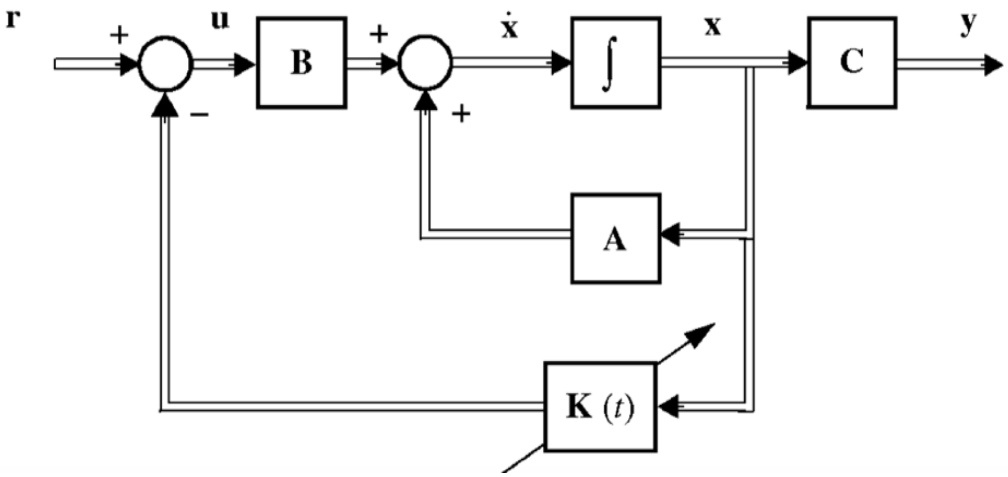


Figura 4. Esquema de regulación LQR [6]

Al aplicarse un LQR a los ejes φ y ϕ de un InnoSat se obtiene los resultados mostrados en las figuras 5 y 6 respectivamente

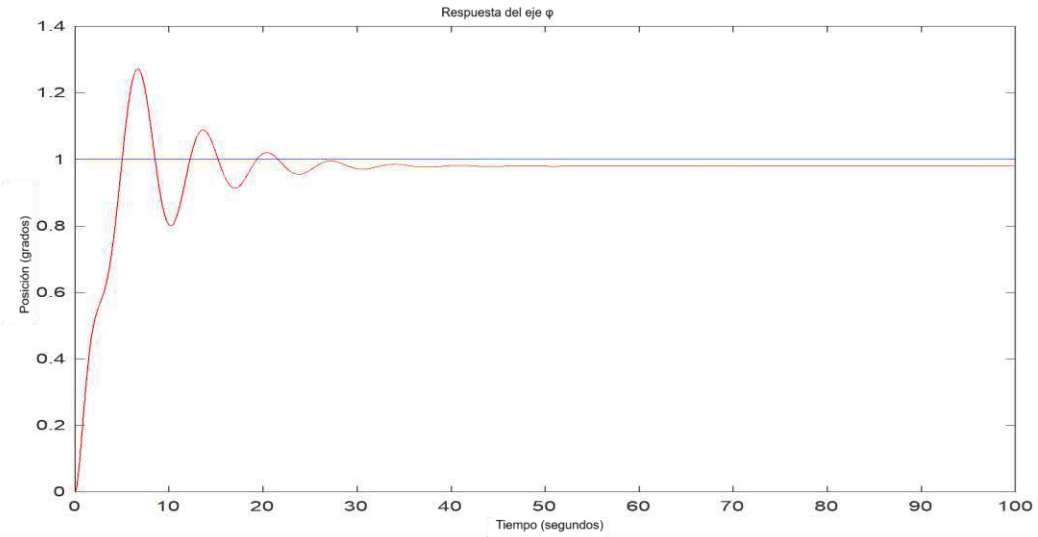


Figura 5. Respuesta del eje φ regulado por LQR

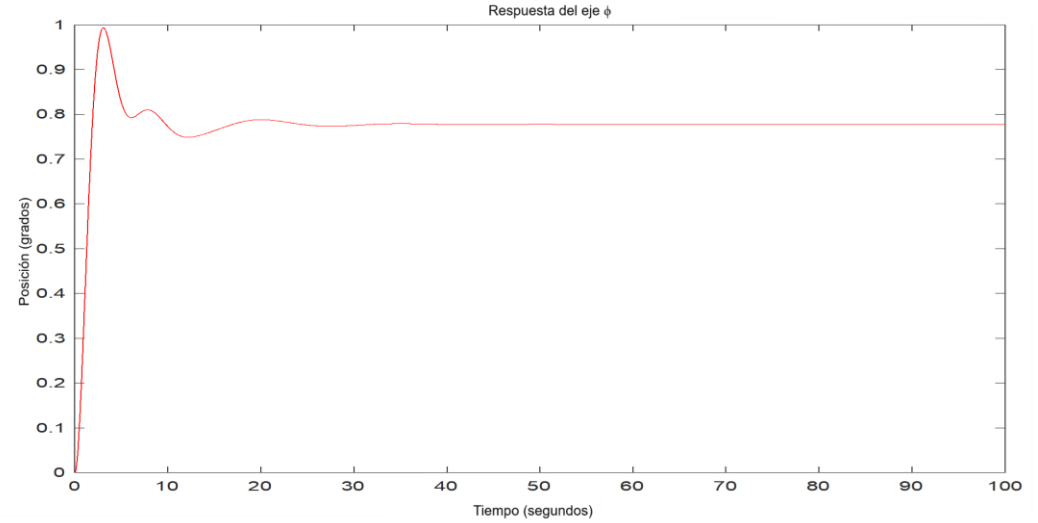


Figura 6. Respuesta del eje ϕ regulado por LQR

ϕ

Como lo muestran las figuras 5 y 6 un regulador lineal cuadrático (LQR) está destinado a garantizar la estabilidad de un sistema de circuito cerrado por medio de ciertas ganancias de retroalimentación. Este tipo de técnica de control pertenece a los métodos de control óptimo dado que tienen como enfoque la minimización de una función matemática denominada función de costo, definida como la suma de las desviaciones de los valores medidos con respecto a los deseados. Pero en el caso del InnoSat se observa un error en estado estable considerable, el cual en diversas posturas teóricas puede mejorarse por medio de técnicas de optimización como los algoritmos evolutivos.

A partir de este estado del arte de la información, este trabajo propone comparar el rendimiento de un regulador de tipo LQR, ajustado mediante un algoritmo genético con codificación real, con respecto a una heurística de desarrollo reciente denominada Cuckoo Search, uno método soportado matemáticamente en Teoría del Caos.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 45, pp. 636 - 649.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

2. Soporte teórico

Como se muestra en la ecuación 6 el ajuste de las ganancias K se puede realizar proponiendo las matrices Q y R por medio de Algoritmos Evolutivos (Evolutionary Algorithms, EA, por sus siglas en inglés), los cuales se definen como una colección de métodos de resolución de problemas de optimización inspirados en los principios biológicos desarrollados por Charles Darwin y Gregory Mendel en el libro "El Origen de las Especies". De manera general un EA, se muestra en la figura 7

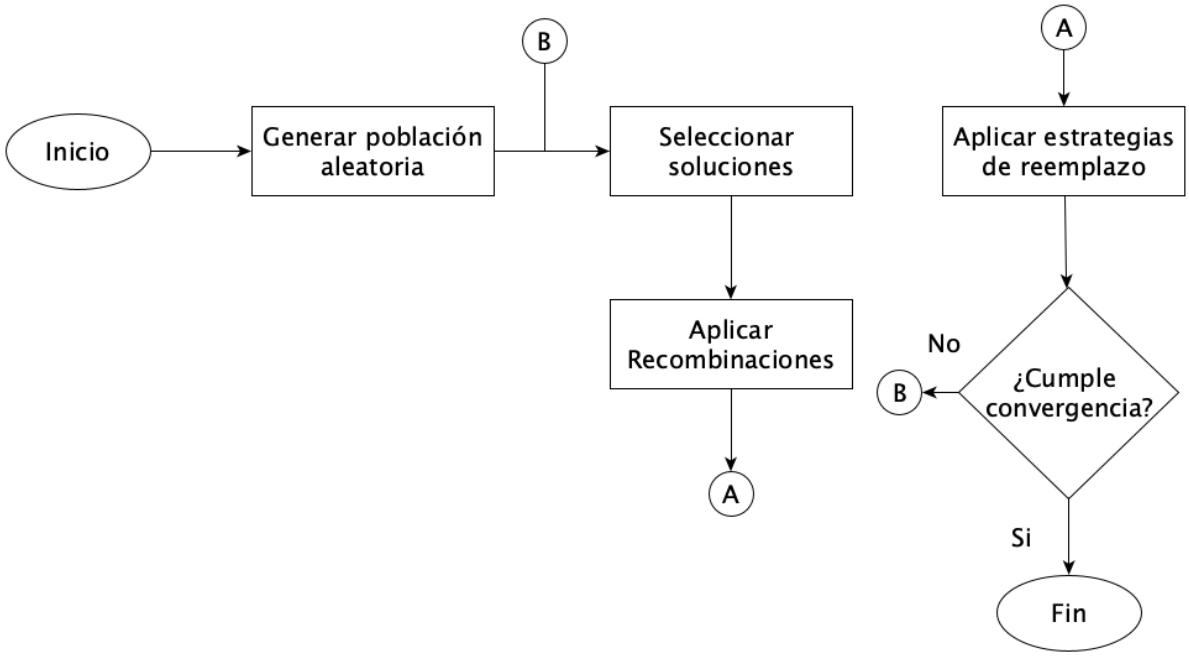


Figura 7. Respuesta del eje ϕ regulado por LQR

El esquema mostrado en la figura 7 permitió a David Goldberg y John Holland proponer el primer Algoritmo Genético (Genetic Algorithm, por sus siglas en inglés, GA) y a Ingo Rechenberg las primeras Estrategias evolutivas [7].

Los EA operan a partir de una colección p de vectores $\vec{x} = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ que constituyen las posibles soluciones a un problema de optimización el cual es modelable por medio de una $f_j(\vec{x})$ función matemática donde x_n representa la *n-esima* variable de un *j-esimo problema,* tal que $\vec{x} \in \mathbb{R} \,||\, \vec{x} \in \mathbb{Z}$ para problemas de optimización numérica o combinatoria respectivamente. Algunos elementos de p , caracterizados por tener el valor más alto en $f_j(\vec{x})$ son sujetos a varios procesos matemáticos de manera iterativa. En los GA una de las operaciones caracteristicas es el cruzamiento el cual es mostrado en las expresiones 7 y 8, cabe destacar que la colección p es denominada cromosomas y a cada uno de sus componentes se denominan genes y representan una variable del problema de optimización a solucionar [8]

$$C_n^{H1} = \beta * C_n^1 + (1 - \beta) * C_n^2 \tag{6}$$

$$C_n^{H2} = \beta * C_n^2 + (1 - \beta) * C_n^1 \tag{7}$$

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 45, pp. 636 - 649.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Donde $\beta = rand[0,1]$, C_n^1 y C_n^2 son los cromosomas por recombinar C_n^{H1} y C_n^{H2} son los cromosomas recombinados. Otro de los operadores propios de una recombinación de un GA es la mutación la cual es un proceso que tiene como finalidad cambiar de un cromosoma, elegido de forma aleatoria, un gen mediante una distribución uniforme dentro de un intervalo definido en los límites superior e inferior de dicha variable, a este operador se denomina mutación al azar o aleatoria. La figura 8 muestra el diagrama de flujo del GA que fue implementado en la presente propuesta

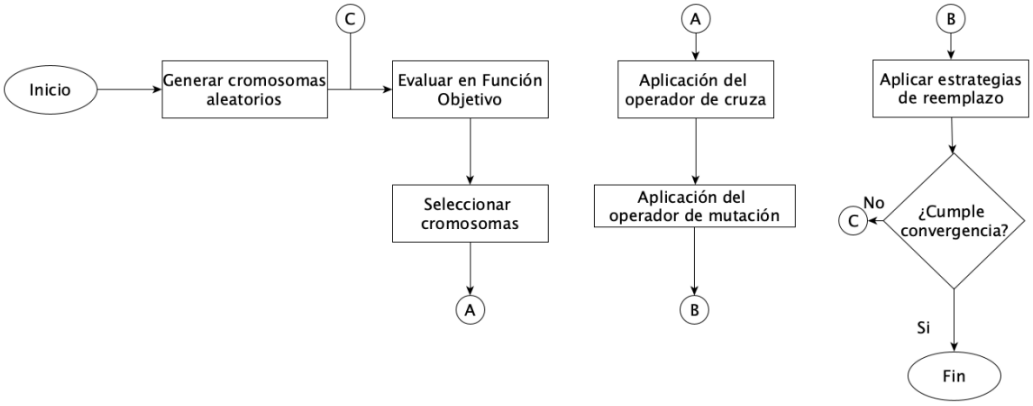


Figura 8. Algoritmo Genético implementado

Cabe destacar que la propuesta desarrollada por Holland con los GA's permitió, posteriormente, desarrollar una variedad de métodos bioinsipirados de solución a problemas de optimizacióna, uno de ellos es el Algoritmo de Busqueda Cuckoo (Cuckoo Search Algorithm,CSA, por sus siglas en inglés), el cuál esta soportado teóricamente en el comportamienton del Cuckoo, un ave depredadora endémica de Europa y Norte de Africa que tiene hábitos migratorios hacia el África sub sariahana y Sureste de Asia. El Cuckoo, en su ciclo reproductivo tiene un comportamiento parasitario el cual consiste en colocar, en nidos de otras especies, sus huevos que al camuflagearse son incubados. El CSA fue propuesto en 2019 por She Yang de la Universidad de Cambridge y Suash Deb de la Universidad C.V. Raman en India. Fundmentalmente este algoritmo hace una exploración y actualización de los nidos, los cuales son posibles soluciones, por medio de un generador de números aleatorios con distribucion caótica, la cual es realizada por medio de una función matemática denominada vuelo de Levy en honor del matemático frances Pierre Lévy, quien realizó la descrión de movimientos de aves por medio de un comportamiento tipo fractal, esto es mostrado en la ecuación 8 [9].

$$\sigma_u = \left[\frac{\mathrm{T}(1+\beta) * sin\left(\frac{\pi * \beta}{2}\right)}{\mathrm{T}\left(\frac{1+\beta}{2}\right) * \beta * 2^{(\beta+1)/2}}\right]^{\frac{1}{\beta}} \tag{8}$$

Donde $\beta = [0.25,3]$, es el tamaño del paso que determina el espacio de búsqueda, T es la función Gamma, la dimensión del generador de números aleatorios es determinado por $S = \frac{u}{|v|^{1/B}} \forall\, u \sim N(0, {\sigma_u}^2), v \sim N(0,1)$. Basado en lo anterior es posible la actualización de los nidos por medio de la expresión mostrada en la ecuación 9 (Shehab et al., 2017) [9]

$$nest_i^{(t+1)} = nest_i^{(t)} + \propto * S\left(\max(nest^t) - min(nest^t)\right) * r \tag{9}$$

Donde $nest_i^{(t)}$ es el nido actual, mientras que $nest_i^{(t+1)}$ es el nido actualizado, por otra parte *r* es un número aleatorio entre 0 y 1, $\propto$ es un parámetro entre 2 y 4. El CSA selecciona aleatoriamente nidos, los actualiza y escoge nuevos nidos loscuales serán remplazados si su valor al ser evaluados en la

función objetivo es mas pequeño que el de los nidos originales, La figura 9 muestra el diagrama de flujo de un CSA

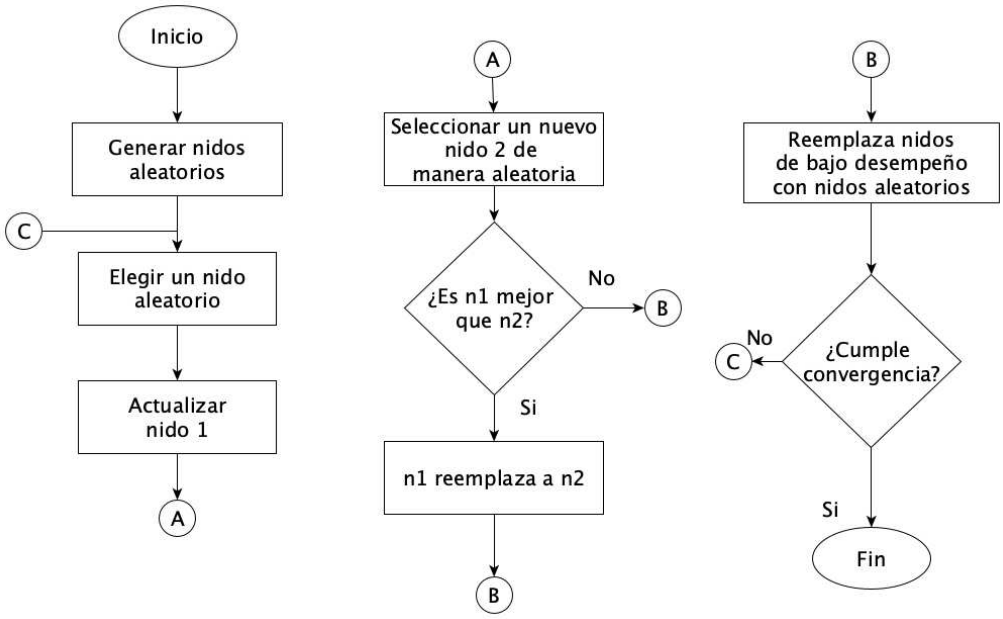


Figura 9. Algoritmo de Busqueda Cuckoo implementado en esta propuesta [9].

3. Metodología

En este proceso investigativo se propone el diseño de LQR's para los ejes φ y ϕ por lo tanto el esquema metodológico propuesto para este proceso investigativo es mostrado en la figura 10 donde las funciones objetivos a optimizar en el presente proceso investigativo son mostradas en las ecuaciones 10 y 11 para φ y ϕ respectivamente. Donde ITAE es la integral del error absoluto multiplicada por el tiempo, IAE es la integral del error absoluto e ISE es la integral del error al cuadrado.

$$f_{obj\varphi} = \frac{1}{\mathrm{ITAE}_{\varphi} + \mathrm{IAE}_{\varphi} + \mathrm{ISE}_{\varphi}} \tag{10}$$

$$f_{obj\phi} = \frac{1}{\mathrm{ITAE}_{\phi} + \mathrm{IAE}_{\phi} + \mathrm{ISE}_{\phi}} \tag{11}$$

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 45, pp. 636 - 649.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

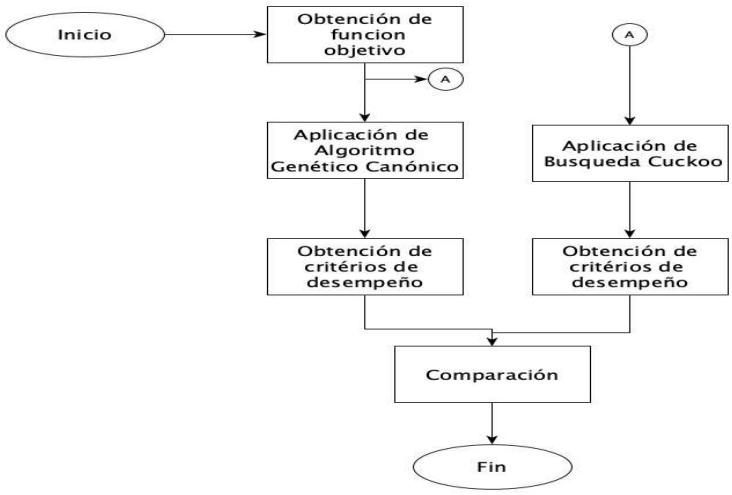


Figura 10. Esquema metodológico.

De acuerdo a lo mostrado en la sección correspondiente a la fundamentación teórica es necesario representar las funciones de transferencia expresadas en 1,2,3 como un sistema de matrices de estado, esto es mostrado en la tabla 1.

Tabla 1. Variables de estado de los ejes de un InnoSat.

matrix / angles	*A*	*B*	*C*	*D*
φ	$\begin{bmatrix} 0 & -1.105 & 0 & -0.1650 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & -0.3023 & 0.8088 \end{bmatrix}$	$[0]$
θ	$\begin{bmatrix} 0 & 0.0071 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$[0 \quad 1]$	$[0]$
ϕ	$\begin{bmatrix} 0 & -1.105 & 0 & -0.1650 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0.3051 & 0.2040 \end{bmatrix}$	$[0]$

Por otra parte, dada la representación mostrada en la tabla 1, es necesaria la configuración de las posibles soluciones $\vec{x} = \{Q_{11}, Q_{22}, Q_{33}, Q_{44}, R_{11}\}$ como lo muestra la tabla 2 para el diseño de los reguladores mostrados en los ejes φ y ϕ , los cuales son objeto de estudio en la propuesta que se documenta en el presentra trabajo.

Tabla 2. Variables de estado de los ejes de un InnoSat.

Matrices / Angulos	*Q*	*R*
φ	$\begin{bmatrix} Q_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} \end{bmatrix}$	$[r_{11}]$

ϕ	$\begin{bmatrix} Q_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} \end{bmatrix}$	$[r_{11}]$

La tabla 3 muestra las caracteristicas operativas de los algoritmos usados en esta propuesta, las cuales fueron las mismas para los angulos φ y ϕ

Tabla 3. Caracteristicas de los algoritmos propuestos

	GA y CSA
Tamaño de población (posibles soluciones)	100
Intervalo de población	$Q_{11} = rand[0,10]$ $Q_{22} = rand[0,10]$ $Q_{33} = rand[0,10]$ $Q_{44} = rand[0,10]$ $R_{11} = rand[0,10]$

4. Resultados

Para el proceso investigativo documentado en esta propuesta se realizaron las comparativas entre los ejes ψ y φ dado que, de acuerdo a la literatura especializada, presentan una mayor dificultad para el diseño de reguladores en comparación con el angulo θ, la cual se caracteriza por ser una función de segundo orden.En las tablas 4 y 5 se muestran los criterios de desempeño: tiempo de establecimiento t_s, sobre impulso M_p y error en estado estable E_{SS} además de los errores descritos en la función objetivo para los ángulos ϕ y φ respectivamente. Se resalta en color rojo los mejores valores obtenidos por los algoritmos

Tabla 4. Criterios de desempeño del ángulo ϕ

Criterio de desempeño	Ajuste con GA	Ajuste con CSA
t_s	10	10
M_p	1.0422	1.0422
ITAE	0.0169	0.0186
IAE	1.6888	1.8557
ISE	0.9888	0.9748
E_{SS}	0.0089	6.2960e-04

Tabla 5. Criterios de desempeño del angulo φ

Performance criteria	Adjustment with Ga	Adjustment with Cuckoo Search
t_s	20	16
M_p	1.2720	1.124
ITAE	0.0333	0.0343
IAE	3.3342	3.4324
ISE	2.0249	2.2465
E_{SS}	-3.51e-04	-2.6530e-04

Las matrices Q y R que se obtienen por medio de un GA usado en esta propuesta se muestra en la tabla 6 para los ejes ψ y φ

Tabla 6. Matrices Q y R obtenidas con un GA

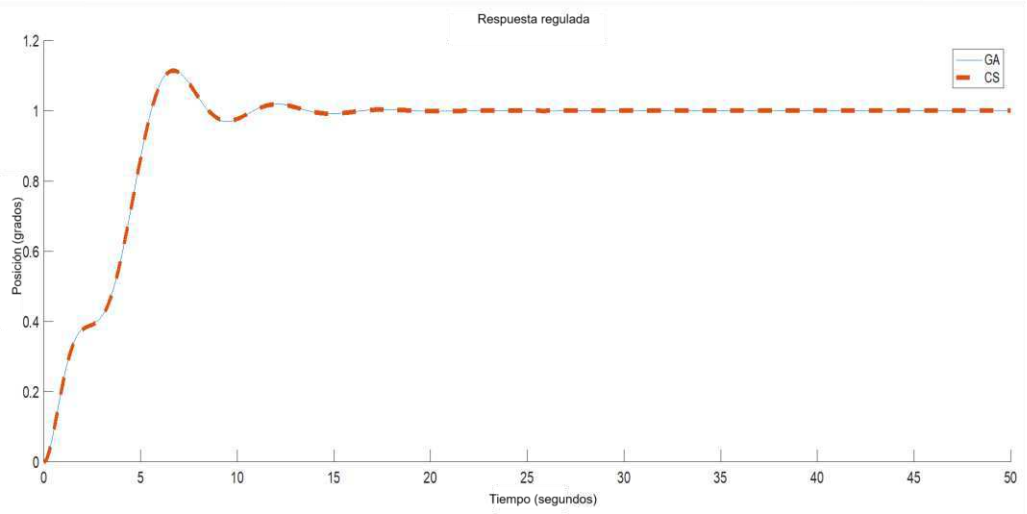
Matrices / Angulos	Q	R
φ	$\begin{bmatrix} 0.0097 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.6210 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0018 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7.2515 \end{bmatrix}$	$[11.5666]$
ϕ	$\begin{bmatrix} 21.9797 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0037 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0035 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.3889 \end{bmatrix}$	$[27.0171]$

Las matrices Q y R que se obtienen por medio de un CSA usado en esta propuesta se muestra en la tabla 7 para los ejes ψ y φ

Tabla 7. Matrices Q y R obtenidas con un eje CSA

Matrices / Angulos	Q	R
φ	$\begin{bmatrix} 0.0494 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0221 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0107 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5945 \end{bmatrix}$	$[0.9483]$
ϕ	$\begin{bmatrix} 3.9271 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0003 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0098 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0422 \end{bmatrix}$	$[4.5016]$

Las figuras 11 y 12 muestra las respuestas al escalo unitario para los ejes ϕ y φ respectivamente



Convergencia Mecatrónica, Capítulo 45, pp. 636 - 649.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Figura 11. Respuesta regulada por LQR al escalón unitario del eje ϕ

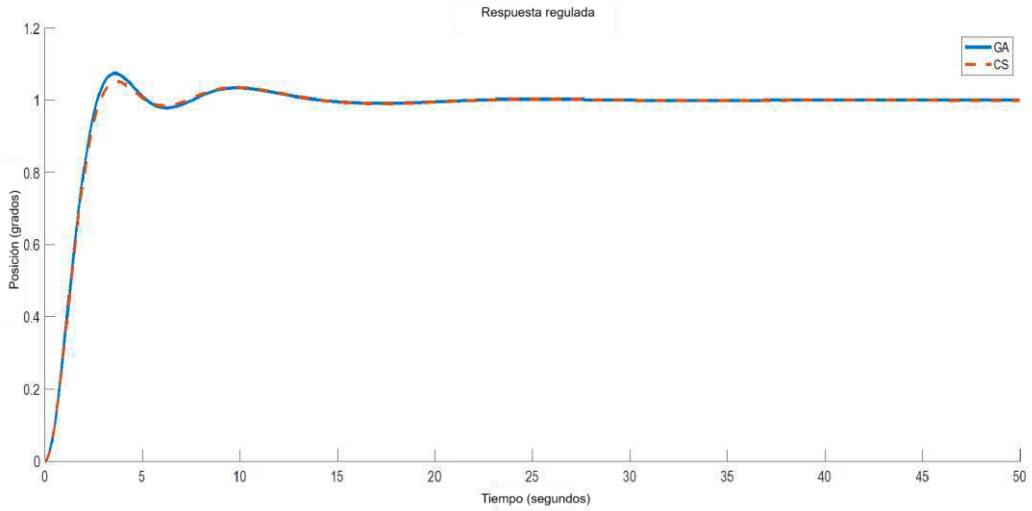


Figura 12. Respuesta regulada por LQR al escalón unitario del eje φ

Por otra parte, la convergencia de los algoritmos GA y CSA, es decir la respuestas de estos es mostrada en las figuras 13 y 14 para los ejes ϕ y φ

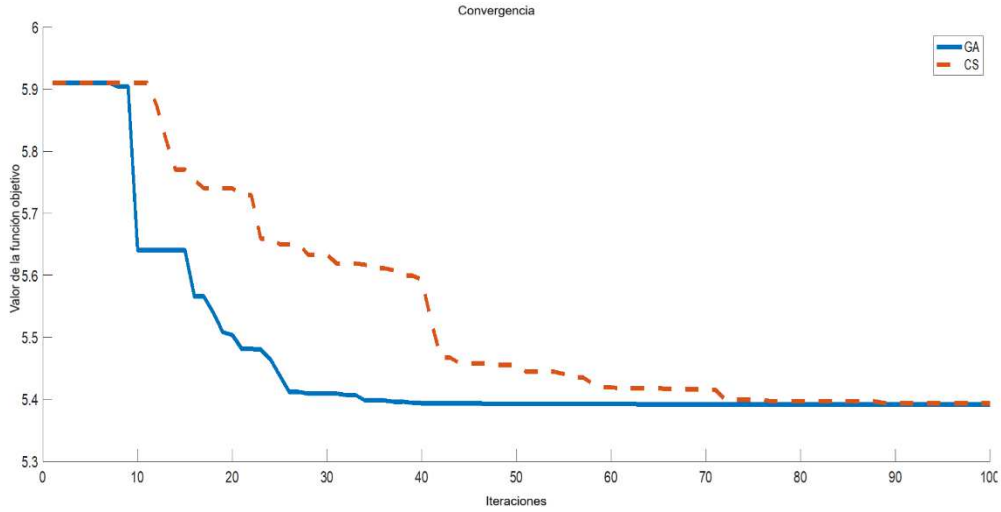


Figura 13. Convergencia del eje ϕ

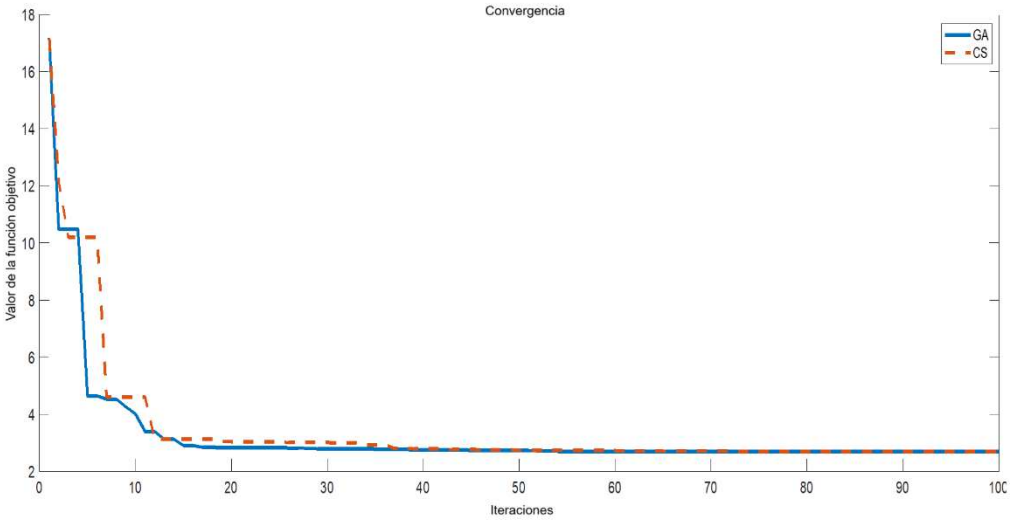


Figura 14. Convergencia del eje φ

5. Conclusiones

Como se puede observar en las figuras mostradas en las secciones anteriores de este proceso investigativo, el comportamiento de los controladores con GA y CSA es similar, pero se puede observar que el porcentaje de error en el estado estacionario presenta una amplia mejora con respecto al ajuste realizado mediante un GA. Por esta razón, como trabajo futuro sería necesario hibridar ambos métodos de solución de un problema de optimización como el planteado en esta propuesta

A partir de los resultados mostrados es posible establecer futuras líneas de actuación como las que se describen a continuación:

- Realizar un análisis estadístico inferencial, el cual permitirá determinar si existen diferencias estadísticamente significativas
- Probar con nuevos métodos heurísticos
- Proponer una representación de la rotación del InnoSAt como un modelo del tipo MIMO, múltiples entradas, múltiples salidas

Actualmente en México se realizan esfuerzos encaminados a insertar al país en la exploración espacial, esfuerzos realizados por universidades públicas en coordinación con la agencia espacial mexicana, como el documentado en esta propuesta están encaminados a desarrollar tecnología propia.

Referencias

[1] S.M. Sharun, M.Y.Mashor, M.N. Norhayati, Sazali, Yaacob, Muhyi Yaakob (2011). ADAPTIVE NEURO-CONTROLLER BASED ON HMLP NETWORK FOR INNOSAT ATTITUDE CONTROL. International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering. pp. 355-360, doi: 10.1109/INECCE.2011.5953906

[2] Sharun, S. M., Mashor, M. Y., Mohd Nazid, N., Yaacob, S., & Wan Jaafar, W. N. (2011). INNOSAT ATTITUDE CONTROL SYSTEM BASED ON ADAPTIVE NEURO-CONTROLLER. Journal of Information and Communication Technology, 10, 45–65. Retrieved from https://e-journal.uum.edu.my/index.php/jict/article/view/8108

[3] Fadly, M., & Sidek, O. (2010). Development of Attitude Determination for Student Pico-Satellite INNOSAT. Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology. Bali, Indonesia.

[4] Biblal, M., Vijayan, R., Schilling, K.(2019). SDRE CONTROL WITH NONLINEAR J2 PERTURBATIONS FOR NANOSATELLITE FORMATION FLYING, IFAC-PapersOnLine, Volume 52, Issue 12, 2, Pages 448-453, https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.284

[5] H. H. A., M. Y. Mashor y M. C. Mahdi, “Performance of Manual and Auto-Tuning PID Controller for Unstable Plant - Nano Satellite Attitude Control System”, en 2018 6th Int. Conf. Cyber IT Service Manage. (CITSM), Parapat, Indonesia, 7–9 de agosto de 2018. IEEE, 2018. Accedido el 22 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible: https://doi.org/10.1109/citsm.2018.8674375

[6] J. A. B. Quispe, R. J. H. Kemper y S. R. P. Gardini, “Linear Quadratic Regulator (LQR) Control for the Active Suspension System of a Four-Wheeled Agricultural Robot”, en 2023 IEEE XXX Int. Conf. Electron., Elect. Eng. Comput. (INTERCON), Lima, Peru, 2–4 de noviembre de 2023. IEEE, 2023. Accedido el 23 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible: https://doi.org/10.1109/intercon59652.2023.10326049

[7] I. Rechenberg, “Evolution, robotics and the somersaulting spider”, en GECCO '19: Genetic Evol. Computation Conf., Prague Czech Republic. New York, NY, USA: ACM, 2019. Accedido el 23 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible: https://doi.org/10.1145/3321707.3326936

[8] G. Singh y N. Gupta, “A Study of Crossover Operators in Genetic Algorithms”, en Springer Tracts in Nature-Inspired Computing. Singapore: Springer Singap., 2021, pp. 17–32. Accedido el 23 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible: https://doi.org/10.1007/978-981-16-3128-3_2

[9] M. Shehab, A. T. Khader y M. A. Al-Betar, “A survey on applications and variants of the cuckoo search algorithm”, Appl. Soft Comput., vol. 61, pp. 1041–1059, diciembre de 2017. Accedido el 23 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible: https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.02.034

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 46, pp. 650 - 657.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Diseño de un Modelo de Orden Reducido (ROM) para una Batería de Litio

✉Ibañez Olvera Mario, Jaramillo Sierra Bethsabet, Rivera Ramos Diana Isela y Romero Arizmendi Julio César

TecNM – Tecnológico de Estudio Superiores de Tianguistenco
✉mario_mecatronica@test.edu.mx

Resumen

El presente trabajo relata sobre el diseño de un modelo de orden reducido (ROM) para una batería de litio a través de simulación a través del método de elementos de volumen finito. El motivo por el cual se llegó a realizar el presente trabajo fue por la carente metodología para el diseño de una ROM con la aplicación de una batería de litio para la electromovilidad, lo cual trae consigo un gran costo en la producción de estos mismo y menor eficiencia para su aplicación.
Por lo que el uso de un Modelo de Orden Reducido (ROM), es el diseño de un modelo físico a un modelo digital con el cual está compuesto por modelos de regresión que utilizan los resultados de la modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) como valores objetivo y los datos del modelo de Investigación y Pronóstico del Tiempo (WRF) como valores descriptores. Una forma de entrenar estos modelos de regresión consiste en construir un único modelo al que se le introduzcan directamente variables descriptivas que definan la ubicación del punto.
El diseño, simulación y optimización de una ROM se realizará mediante el uso del software de ANSYS y las diversas herramientas y escenarios que este mismo ofrece para los usuarios, siendo las principales herramientas por usar serán ANSYS Mechanicals, ANSYS Fluent y ANSYS Electronics. El uso de estos softwares se debe a que se usan para el Método de Elementos de Volumen Finito (FVE), lo cual nos proporciona una simulación con resultados más precisos y realistas posibles.

Palabras clave: Diseño, Electromovilidad, Batería, Litio, Simulación.

Abstract

This paper reports on the design of a reduced order model (ROM) for a lithium battery through simulation using the finite volume element method. The reason why this work was carried out was due to the lack of methodology for the design of a ROM with the application of a lithium battery for electromobility, which brings with it a high cost in the production of these same and lower efficiency for its application.
Therefore, the use of a Reduced Order Model (ROM) is the design of a physical model to a digital model with which it is composed of regression models that use the results of the Computational Fluid Dynamics (CFD) model as target values and the data from the Weather Research and Forecasting (WRF) model as descriptor values. One way to train these regression models is to build a single model to which descriptive variables that define the location of the point are directly introduced.
The design, simulation and optimization of a ROM will be done using ANSYS software and the various tools and scenarios that it offers to users. The main tools to be used being ANSYS Mechanicals, ANSYS Fluent and ANSYS Electronics. The use of this software is since it is used for the Finite Volume Element Method (FVE), which provides us with a simulation with the most precise and realistic results possible.
Since the base of the ROM is based on a digital design better known as Computer Aided Design (CAD) in which, with the support of the software, the characteristics of this same battery model in physical state

can be recreated in a simulated manner, so adjustments can be made regardless of the type of scenario to which the CAD wants to be subjected, as well as being able to change some others based on the model that is available in order to optimize the use of this same as much as possible, in addition to being able to prolong the useful life period.

Keywords: Design, Electromobility, Battery, Lithium, Simulation.

1. Introducción

El vehículo eléctrico está llamado a formar parte de la movilidad diaria, debido a sus beneficios en materia de eficiencia energética y reducción de la dependencia de los combustibles fósiles. Así como por la reducción de emisiones contaminantes y de efecto invernadero, en un momento en el que el transporte representa la cuarta parte de las emisiones de gases de efecto invernadero. [1]
En base a lo anterior mencionado, podemos decir que la electromovilidad es un modelo de transporte ecológico el cual no ha sido desarrollado a su máxima capacidad, en lo cual se basa el proyecto, para poder maximizar de manera eficiente el uso de la batería de litio integrada, que estos mismos poseen a través de un apoyo a base del auto aprendizaje, que nos beneficiará consiguiendo un mayor margen de uso y que a través del tiempo seguirá mejorando.
Por lo que el desarrollo de la electromovilidad en México no es muy desarrollado, ya que, en años anteriores se buscaron soluciones alternas al uso de combustibles fósiles, lo que los llevo al desarrollo del STC metro, el uso del tren ligero, el cable bús, la eco bici, etc. Además de que estos mismos ayudarían a la meta de la reducción de la emisión de CO2, sin embargo, para poder reducir este mismo es necesario llegar a reducirlo en base a los más grandes emisores de este mismo, siendo los transportes, agregando que la solución es convertir la movilidad en base a combustibles fósiles a una movilidad más ecológica, siendo esta la electromovilidad.
Es por ello que el uso de los modelos de orden reducido aplicado en las simulaciones multi físicas son una herramienta que posee pocas técnicas de procesamiento, ya que, por ejemplo existe otra forma de simular baterías, pero en este caso es de plomo acido, con la cual solamente se enfoca en la parte eléctrica de la misma batería, el mismo autor nos menciona que: “se trata sobre el modelaje y la simulación de una batería de plomo-ácido utilizando fuentes dependientes de voltaje y corriente, así como también, bloques aritméticos que forman parte de la biblioteca de las distintas herramientas computacionales orientadas al análisis de circuitos eléctricos y electrónicos.” [2].
Sin embargo, a comparación de lo mencionado, la realización de una ROM para simulación de las baterías de litio, es un método mejorado y con mayor nivel de eficiencia y control al momento de realizar la pruebas de manera multi física, en las cuales su puede observar escenarios, por ejemplo, la forma en la que las celdas se calientan y cuáles son las más propensas en calentarse, además, de poder observar los niveles de estabilidad eléctrica en las entradas y salidas de la ROM, con las cuales someten todas las celdas del modelo. Por lo que podemos concluir que el uso de una ROM es la mejor alternativa respecto a la realización de pruebas de uso industrial.

2. Metodología

Se ha dedicado mucha atención al desarrollo de modelos simplificados a lo largo de los años, con el objetivo de predecir con precisión ciertas variables de las máquinas eléctricas, incluso ante variaciones significativas en las condiciones de funcionamiento. Por lo que se menciona mediante el siguiente texto: “Hasta 1960 el comportamiento de las máquinas de inducción se calculaba mediante las ecuaciones de tensión de régimen permanente y la relación dinámica entre la velocidad del rotor y el par electromagnético.” [3]

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 46, pp. 650 - 657.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

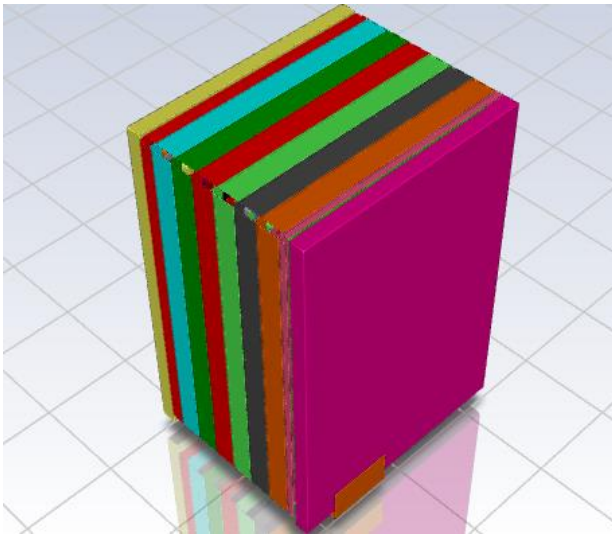


Figura 1 Modelo CAD de las celdas de la batería de litio

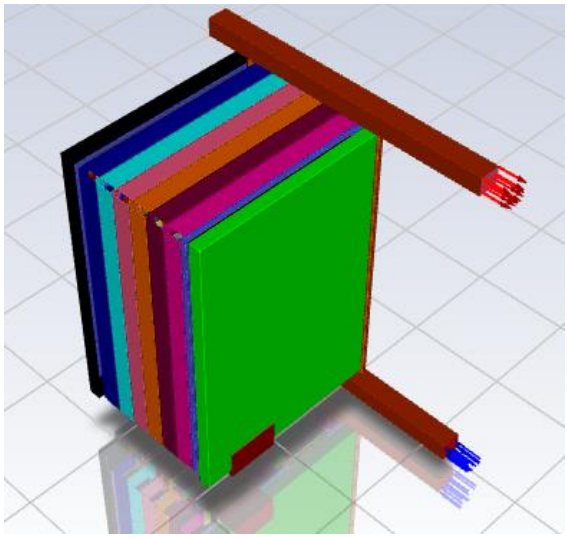


Figura 2 Modelo CAD de la batería MIMO de litio

Por lo que en la Figura 3 se muestra el diagrama de bloques respecto al proceso metodológico que se realizó para la obtención de la ROM de la batería de litio que desarrollo en el presente documento.

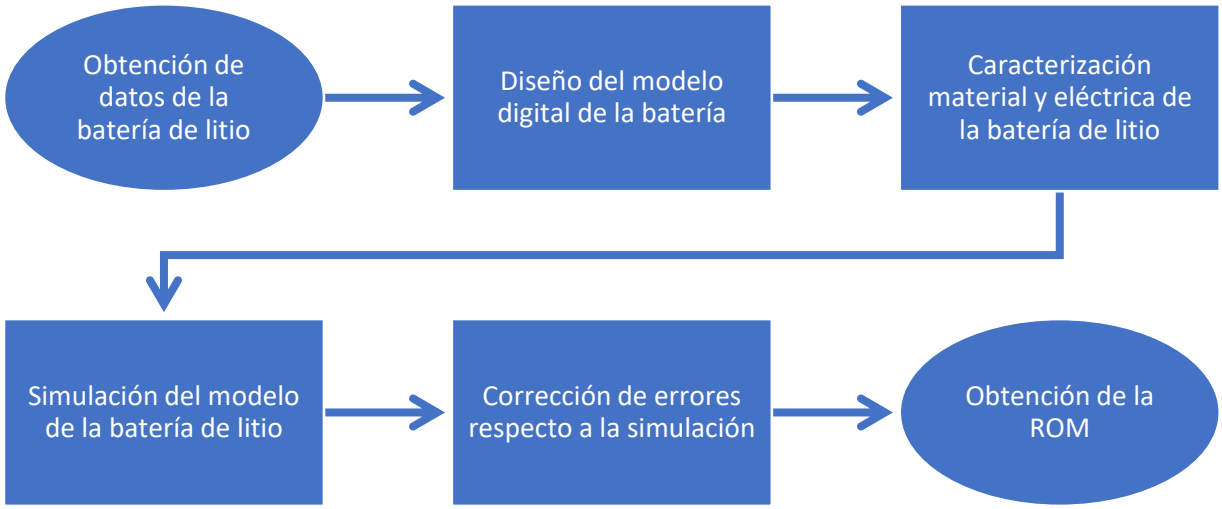


Figura 3 Diagrama de bloques del proceso metodológico

2.1 Simulación Del Modelo De Orden Reducido

2.1.1 Configuración del modelo para la simulación térmica

Iniciaremos activando el calor de Joule en las zonas pasivas del modelo, esto a través de la ventana de parámetros del modelo, con una fuente de energía de 0 y la corriente en 0 en los parámetros del modelo, para poder someterlo a una ROM de SVD, en la configuración del calor del volumen seleccionaremos las celdas de la batería y las uniremos en un grupo con un valor de 20W.

2.1.2 Parámetros mecánicos de los materiales

Activaremos la corriente de calor de entrada de Joule con un amperaje de 100ª, para las zonas de temperatura exportadas seleccionaremos todas las zonas del modelo. Cerramos el configuramos de corriente de calor de entra de Joule y ahora configuraremos los parámetros de la simulación, con la cual será solucionada por el método de pasos de tiempo de tipo paramétrica, con un tiempo máximo de 30000s, un tiempo inicial de pasos de 1s, un tiempo máximo de pasos de lado de 200s, un factor de incrementación de tiempo de pasos de 1.15, un numero de pasos de 8 y un máximo de interacciones por paso de tiempo de 15.

2.1.3 Establecimiento de los límites de las celdas para la batería de litio

Una vez que haya terminado la simulación cerramos Fluent y abriremos el software de Twin Builder con el cual cargaremos el archivo de tipo Fluent, esto es debido a que se trabajó con este tipo de software, una vez cargado configuraremos la ROM con un número de entradas siendo 2, activaremos los archivo de respuesta de paso binario, el nombre del modelo será SVD_ROM para identificar el tipo de ROM a la que fue sometido el modelo, buscamos los archivos que nos generó el proyecto de Fluent, generamos y cerramos.

2.1.4 **Parámetros para las condiciones de las zonas límites de las celdas**

Ya cargada la configuración, nos abrirá la interfaz con la cual cargaremos el componente del modelo ROM de la batería, en la cual se anexarán componente para completar el diagrama de tipo eléctrico, con la que serán de dos constantes un valor cuadrado. Configuraremos los siguientes parámetros: primero habilitaremos todas las salidas y segundo crearemos un reporte estándar de tipo rectangular.

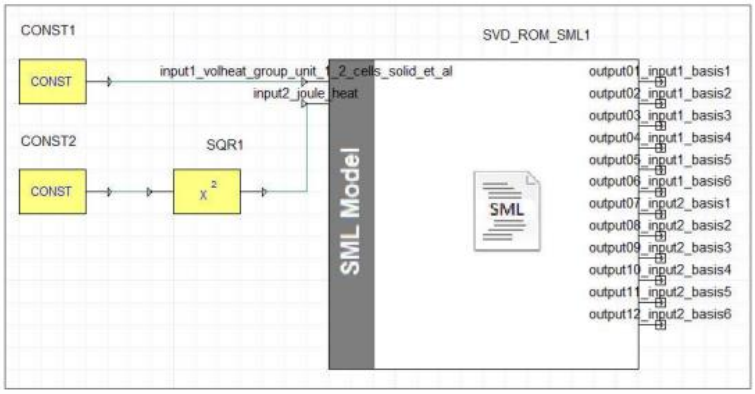


Figura 4 Circuito de la batería

2.1.5 Discretización del modelo mecánico

En el árbol del proyecto editaremos le TR de análisis, con el cual configuraremos un tiempo de finalización de 30000s, un paso del tiempo mínimo de 0.1s, un paso de tiempo máximo de 10s, guardamos la configuramos y analizamos el modelo. Cerramos y volvemos a abrir Fluent para realizar el post procesamiento del modelo con el cual se configurará un tiempo de 2000s en el que se ejecutará la simulación transitoria usando un tamaño de paso de tiempo de 10s, con un máximo de 20 interacciones.

En la configuración del modelo de la batería, iremos al post procesamiento de la ROM, en la cual buscaremos los datos del proyecto del modelo que se realizó en Twin Builder, en la cual se abrirá la lista para seleccionar 2000s para reconstruir la temperatura usando la ROM SVD.

2.1.6 Selección de cuerpos y parámetros de los cuerpos

Comenzaremos verificando que el modelo de energía este activado, al igual que el modelo de la batería y que el modelo de viscosidad sea de SST k-omega. Revisando en la configuración del modelo de la batería configuraremos el método de solución como CHT Coupling.

Nos dirigimos al aparado de contactos térmicos del modelo de la batería, para seleccionar el componente negativo “terminal_n” y el componente positivo “teminal_p”, una vez seleccionados ambos componentes, nos dirigiremos a la opción de la parte debajo de la ventana, la cual seleccionaremos.

Terminamos y nos dirigimos a los parámetros del modelo, en los cuales nosotros modificaremos todos los parámetros a 10 W, ya modificado todos los parámetros daremos clic en okey para guardar todas configuraciones que se realizaron y cerramos la ventana.

2.1.7 Parámetros mecánicos de los materiales

Comenzaremos verificando que el modelo de energía este activado, al igual que el modelo de la batería y que el modelo de viscosidad sea de SST k-omega. Revisando en la configuración del modelo de la batería configuraremos el método de solución como CHT Co De acuerdo los materiales que necesarios y que van acorde a la hoja de datos del fabricante, por lo que mediante la siguiente tabla que se muestra a continuación se puede mostrar el tipo de material y que acorde a los parámetros mecánicos que deben tener estos mismo.

Tabla 1 Propiedades físicas de los materiales a crear

NOMBRE	DENSIDAD	CP (SPECIFIC HEAT)	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
Active-material	3000 kg/m3	1224 J/kg-K	tipo ortotrópico
foam	320 kg/m3	2000 J/kg-K	0.08 W/m-K
plastic	1450 kg/m3	2000 J/kg-K	0.02 W/m-K
cobre	8978 kg/m3	381 J/kg-K	387.6 W/m-K

Por lo que, mediante la siguiente tabla se mostrara las piezas en las que se deben de establecer los materiales que se han creado anteriormente, esto con el propósito de cumplir con los requerimientos físicos de la simulación, de acuerdo con la batería de litio.

Tabla 2 Clasificación de componentes para caracterización del material

Componente	Material
Celdas	Active-material
Pestaña, aleta de enfriamiento	Aluminio
Conectores, conectores finales	Cobre
Espuma	Espuma
Soportes finales	Plástico

2.1.8 Establecimiento de los límites de las celdas para la batería de litio

Configuraremos las zonas de las celdas del modelo de la batería, para ello configuraremos el fluido de agua, configuraremos el nombre del material a “wáter-liquid”. Después de eso copiaremos las condiciones de la primera celda en las otras 13 celdas, por lo que seleccionado “cell-01:1” en la ventana

de la izquierda, buscaremos “*cells*” en la ventana de la derecha y seleccionamos las 13 celdas en blanco.

2.1.9 Parámetros para las condiciones de las zonas límites de las celdas

Una vez terminado la configuración de los parámetros de las condiciones de las zonas de las celdas, ahora se configurará los parámetros de las condiciones de los límites del modelo, por lo que se modificará la entrada de la variable “inlet”, en la cual se modificará con una velocidad de magnitud de 0.0005, con una configuración de tipo intensidad y diámetro hidráulico, con una intensidad de turbulencia de 5%, un diámetro hidráulico de 0.01578m y una temperatura de 300°K.

2.1.10 Configuración de las soluciones para la simulación

En el apartado de soluciones, configuraremos que las ecuaciones que se realizaran en el software sean aplicadas a las componentes del flujo y la turbulencia, para que después se configure los reportes de los residuos y posteriormente configurar la solución del cálculo con un numero de interacciones de 300.

Después de que el proceso termine, nos redirigiremos al apartado de soluciones, en el cual modificaremos los parámetros del control de las ecuaciones, en las cuales se cambiara únicamente a la ecuación de energía, con un tiempo de tipo trascendental, para que después en el apartado de reportes de residuos vamos a cambiar el criterio absoluto a 1e-10.

3. Resultados

3.1 Estabilidad Respecto A La Condición Térmica De Las Celdas

Con respecto al presente diagrama de estabilización del flujo, en la cual alcanza el punto de estabilización del modelo de la batería SVD, la cual cambiara a una respuesta transitoria cuando se haya ejecutado una respuesta de tipo escalonada, sino es el caso entonces el tipo de respuesta que se tendrá en el diagrama se una respuesta de tipo de interacción con respecto a la temperatura del modelo de la batería.

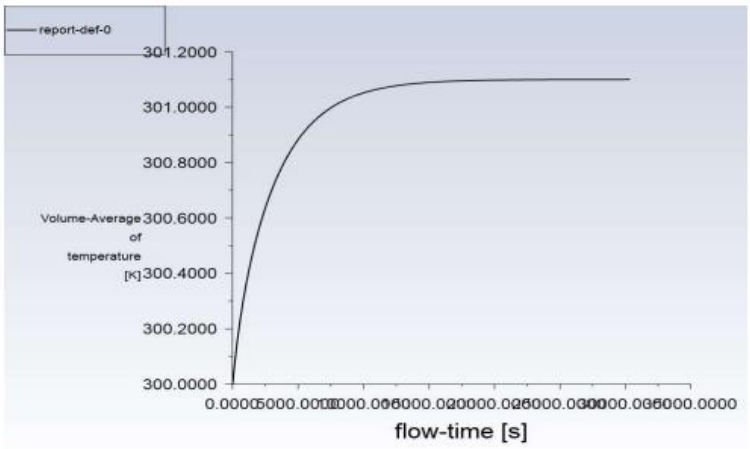


Figura 5 Gráfica de estabilidad térmico de modelo de la batería

3.2 Demostración De La Condición Térmica De Las Celdas De La Batería De Litio Por Medio De La Simulación

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 46, pp. 650 - 657.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Con respecto al presente diagrama de estabilización del flujo, en la cual alcanza el punto de estabilización del modelo de la batería SVD, la cual cambiara a una respuesta transitoria cuando se haya ejecutado una respuesta de tipo escalonada, si no es el caso entonces el tipo de respuesta que se tendrá en el diagrama se una respuesta de tipo de interacción con respecto a la temperatura del modelo de la batería.

Basándonos en los datos obtenidos a lo largo de la simulación de Fluent y Twin Builder, y durante el tiempo de 2000 s que se ejecutó la simulación transitoria usando un tamaño de paso de tiempo de 10 s, con un máximo de 20 interacciones y se puede observar las celdas en las que ocurre la mayor concentración de temperatura que hay y que por lo visto es capaz de llegar hasta los límites de la escala que se tiene, este post procesamiento que realiza a través de la comparativa del modelo normal y el modelo con los resultados del CFD, la cual arroja que los resultados son muy similares.

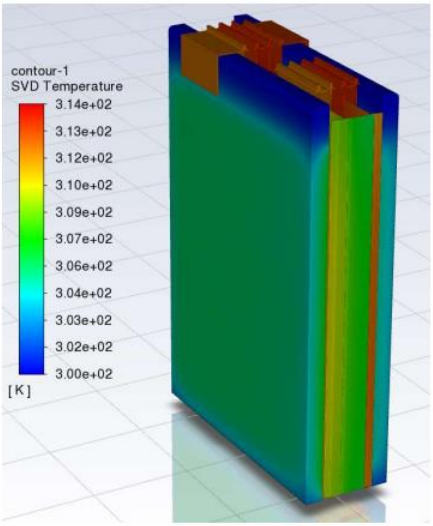


Figura 6 Resultados de la ROM

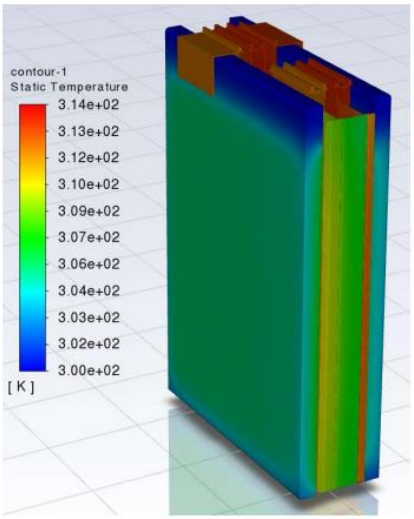


Figura 7 Resultados del modelo CFD

3.2 Estabilidad Eléctrica Para La Condición De La Batería Mimo

Según la respuesta obtenida de la simulación, se puede apreciar como las constantes van en decaimiento, tratando de lograr una estabilidad en algún punto del plano, esto nos puede indicar que se pueden aumentar el número de interacciones para tratar de observar la estabilidad que se podría alcanzar en dado caso.

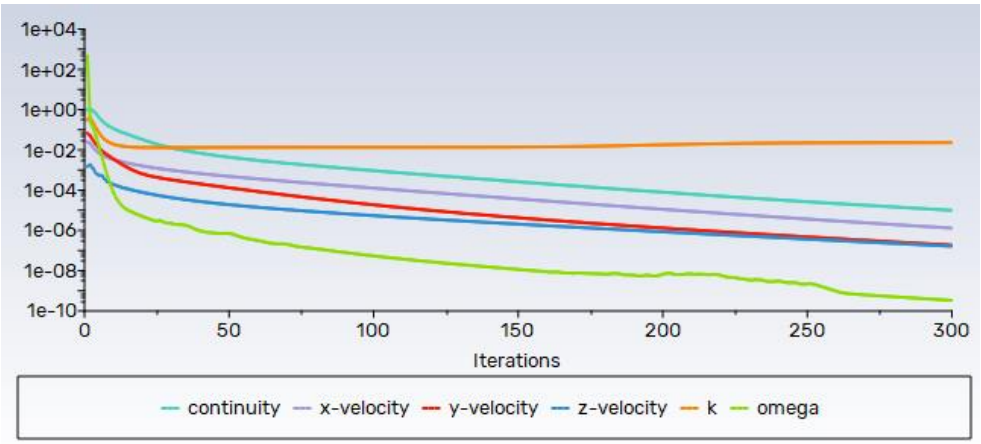


Figura 8 Grafica de estabilidad de la constante

4. Conclusiones

En resumen, ROM es una solución alternativa ecológica al uso de combustibles fósiles y con base en los datos obtenidos se puede mencionar que a través de herramientas de simulación se puede observar un mayor rendimiento de las baterías de litio mediante pruebas eléctricas. y una adecuada interacción eléctrica a través de sus entradas y salidas, además de contar con un diseño eficiente que extiende la vida útil de las baterías más allá del tiempo previsto, asegurando que almacenen suficiente calor durante su uso.

Con todo, a lo largo del proceso de diseño de ROM, uno puede encontrar que es una herramienta más amplia que, con el tiempo, permitirá a las empresas innovar y a ellas mismas desarrollar productos de manera eficiente. Para poder satisfacer las necesidades de la sociedad, cabe recalcar que en este proceso existen obstáculos en las capacidades de las herramientas utilizadas, por lo que teniendo en cuenta que para desarrollar el uso de ROM es necesario contar con herramientas que puedan Ser utilizado por el propio software para el procesamiento y desarrollo de datos. Optimizar al máximo. Durante el desarrollo de este proyecto se observó que la mayoría de las baterías experimentan un aumento de temperatura debido a esto, y durante el proceso de modelado intentamos asegurar que el de la batería fuera mínimo para evitar daños a la batería y poder aumentar la eficiencia de esta misma.

Referencias

[1] A. Villasol López, R. Díaz Santos, M. Castro Fernández y J. M. Villarroel Castro, «Vehículos eléctricos en Cuba: un caso de estudio de la empresa de CUBATAXI de La Habana,» 04 01 2022. [En línea]. Available: https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/652/800. [Último acceso: 08 04 2024].

[2] H. Fernández, A. Martínez I, V. Guzmán A y M. I. Giménez, «SciELO,» 25 01 2005. [En línea]. Available: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212005000100005&lang=pt. [Último acceso: 05 06 2024].

[3] Secretaría de Energía de México, «Gobierno de México,» 07 2023. [En línea]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/857010/cuaderno_ELECTROMOVLIDAD_EN_M_XICO.pdf. [Último acceso: 16 04 2024].

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 47, pp. 658 - 666.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Simulación Numérica de la Distribución Luminosa para una Calavera Trasera de un Automóvil

✉Ibañez Olvera Mario, Jaramillo Sierra Bethsabet, Rivera Ramos Diana Isela y Gonzalez Zepeda Rodrigo

TecNM – Tecnológico de Estudio Superiores de Tianguistenco
✉mario_mecatronica@test.edu.mx

Resumen

En el presente trabajo se desarrolla un análisis luminoso a una calavera de un automóvil mediante la simulación numérica, con la intención de analizar cómo se comporta la luz dentro de un entorno controlado, observando la propagación de la luz.

Para poder llevar a cabo este proceso es importante definir cada factor que se tomará en cuenta para realizar la simulación, por lo que mediante la metodología de la simulación mediante el elemento finito cubriremos cada requerimiento para realizar la simulación, obteniendo así información valiosa para realizar mejoras de eficiencia y de diseño.

Palabras clave: Análisis luminoso, simulación numérica, distribución luminosa, intensidad luminosa.

Abstract

In the present study, a luminous analysis is conducted on a car's taillight using numerical simulation, intending to examine how light behaves within a controlled environment and observe the light propagation.

To carry out this process, it is crucial to define each factor considered for the simulation. Therefore, employing the finite element simulation methodology, we will address every requirement for the simulation, obtaining valuable information for efficiency and design improvements.

Keywords*: Luminous analysis, numerical simulation, light distribution, luminous intensity.*

1. Introducción

La tecnología de iluminación automotriz ha experimentado una transformación notable con un enfoque destacado en la simulación óptica. Este método ha emergido como un factor clave en el diseño y desarrollo de sistemas de iluminación, particularmente en el ámbito de los vehículos.

En la actualidad, los sistemas LED (Diodo Emisor de Luz) lideran la innovación, gracias a su bajo costo de fabricación, mantenimiento mínimo y calidad operativa excepcional. La simulación óptica se ha convertido en una herramienta esencial para analizar la propagación de la luz y garantizar la conformidad con las normativas. Este enfoque se aplica no solo se limita a luces diurnas y de posición, sino también a luces de cruce y carretera, ampliando las posibilidades y la eficiencia lumínica.

El diseño de iluminación automotriz enfrenta desafíos complejos, desde la integración con sistemas avanzados hasta la adaptación a tecnologías emergentes y la consideración de la

aerodinámica. La simulación óptica aborda estos desafíos mediante un análisis detallado de la fuente de luz, propiedades ópticas del sistema y posibles interferencias mecánicas.

Los estudios de simulación óptica son cruciales para garantizar que la calidad del faro tenga los más altos estándares, como prevenir aberraciones cromáticas y asegurar la adecuada percepción visual del conductor. Estos análisis contribuyen no solo a la mejora de la eficiencia energética, sino también da paso a nuevas propuestas en la estética y la identidad de marca. La simulación óptica facilita el cumplimiento de regulaciones y optimiza la visibilidad en carretera, reduciendo el consumo de energía.

Este enfoque tecnológico no solo proyecta mejorar la eficiencia lumínica, sino que también busca causar un impacto significativo en aspectos clave de la industria automotriz. Desde la reducción de costos de desarrollo hasta el estímulo de la innovación tecnológica, la simulación óptica se postula como una herramienta integral con el potencial de beneficiar significativamente al desarrollo continuo de la industria automotriz.

Dentro del presente artículo, se describe la metodología utilizada para hacer posible el desarrollo de cada uno de los análisis que intervienen en el estudio de la distribución luminosa, a su vez, se busca dar a conocer como el proceso es una parte fundamental en la realización de dicha simulación, dando a conocer datos relevantes con los que con una correcta interpretación, podrán dar paso a mejoras significativas en modelos actuales sin tener la necesidad de realizar pruebas tediosas que podrían influir en la satisfacción y el cumplimiento de estándares de calidad y la eficiencia energética.

2. Conceptos básicos

2.1 Sistema de iluminación en automóviles

El sistema de iluminación en un automóvil desempeña un papel crucial en varios aspectos. Este sistema engloba un conjunto de dispositivos lumínicos ubicados en la parte frontal, lateral y trasera de un vehículo. Su objetivo principal es proporcionar iluminación al conductor para permitir el funcionamiento seguro del automóvil en condiciones de baja visibilidad, mejorando la visibilidad del vehículo. Gracias a las luces, podemos tener visibilidad en condiciones de baja visibilidad, permitiéndonos ver el camino por delante, y también contribuyen a que otros conductores nos vean, convirtiéndose así en un componente fundamental para la seguridad activa, es decir, un sistema que ayuda a prevenir accidentes. Estas luces se activan a través de controles específicos, los cuales pueden variar en cada vehículo, pero generalmente se encuentran en las palancas cercanas al volante. Además, existe un selector que permite elegir entre diferentes tipos de luz, como posición, corto alcance y antiniebla. Este selector suele estar al alcance de la mano, aunque ubicado fuera del entorno inmediato del volante [1].

Adicionalmente, la intensidad lumínica que se mide en candelas es una intensidad lumínica que se percibe a una distancia y dirección determinadas. Estos valores nos permiten estar tan próximos al valor permitido y tan lejos del valor máximo. El valor mínimo de las calaveras traseras va a depender de varios factores externos y pruebas que se hacen en laboratorios específicos para estas pruebas, para obtener estos valores se hace por zonas que van del 1 al 5 y por cada zona hay puntos o grados en el que se hacen las pruebas, donde los valores mínimos son de 10 y como valores máximos son 520, esta tabla nos va a servir como guía para no rebasar el límite permitido y también no estar por debajo del límite mínimo [4].

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 47, pp. 658 - 666.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

2.2 ANSYS

ANSYS, un programa de análisis de elementos finitos ampliamente utilizado en ingeniería y ciencias aplicadas que permite modelar y resolver problemas complejos de manera virtual. La simulación numérica mediante ANSYS de la calavera trasera nos permitirá comprender y analizar en detalle el comportamiento de la propagación de la luz mediante el ojo humano.

2.3 Análisis luminoso

El análisis luminoso de los sistemas de iluminación de un automóvil implica evaluar la intensidad, alcance y distribución de la luz de los faros delanteros y traseros para asegurar una visibilidad adecuada. Se verifica la alineación y calibración de los faros, el funcionamiento de las luces de señalización y la eficiencia energética del sistema. También se examina la resistencia a condiciones adversas y se garantiza el cumplimiento de las normativas locales. Este análisis asegura un rendimiento óptimo del sistema de iluminación, contribuyendo a la seguridad vial y al correcto funcionamiento del vehículo.

2.4 Mejora de Diseño y eficiencia

La implementación de simulaciones luminosas en el diseño de sistemas de iluminación para automóviles da paso a diversas áreas de oportunidad dentro del diseño de estos sistemas. Estas simulaciones permiten optimizar el diseño de faros y ópticas para lograr una distribución uniforme de la luz y evitar deslumbramientos a compañeros conductores. Además, facilitan la elección de tecnologías eficientes energéticamente, contribuyen al diseño aerodinámico, mejoran la seguridad al ajustar la iluminación en diferentes condiciones, optimizan el consumo de energía y aseguran el cumplimiento de normativas. En resumen, la simulación luminosa es una herramienta integral para mejorar la eficiencia y el rendimiento de los sistemas de iluminación vehicular.

3. Caracterización del Modelo

En la figura 1, podemos observar el modelo de análisis, en este caso particular se trata de una calavera trasera, la cual se encuentra aislada de todo el modelo completo, ya que al momento de realizar la simulación se busca reducir la capacidad de procesamiento del mismo, de esta manera el tiempo de análisis será mucho más corto.

Gracias a que se deben de establecer cada una de las fuentes de luz en el modelo es posible obtener los datos necesarios para mejorar el modelo y desarrollar posibles mejoras posteriores.

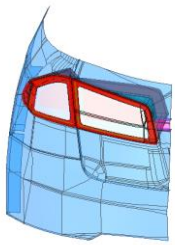


Fig. 1 Modelo digital de la calavera trasera

3.1 Dispersión luminosa

Se refiere a la separación de la luz en sus componentes de diferentes longitudes de onda. Este fenómeno es evidente en prismas y es relevante en la creación de efectos de color en sistemas de iluminación. En una calavera trasera de automóvil, la dispersión controlada de la luz puede ser utilizada para lograr efectos de iluminación personalizados.

3.2 Óptica

Se encarga de estudiar el comportamiento de la luz y su interacción con diversas superficies, medios y sistemas ópticos. Este proceso que involucra la simulación numérica de la distribución luminosa en una calavera trasera de un automóvil es fundamental comprender los principios fundamentales de la óptica, ya que estos principios sustentan todo el proceso de diseño y simulación de sistemas ópticos.

3.3 Reflexión

Es un fenómeno óptico en el que la luz incide en una superficie y rebota de manera que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Este principio es fundamental en el diseño de sistemas de iluminación, ya que permite redirigir y controlar la luz mediante el uso de reflectores y superficies reflectantes.

3.4 Refracción

Es un proceso mediante el cual la luz atraviesa una superficie que separa dos medios con diferentes índices de refracción. Esto ocasiona un cambio en la dirección de la luz. La refracción es un fenómeno importante en el diseño de lentes y otros componentes ópticos utilizados en sistemas de iluminación automotriz para enfocar o dispersar la luz según sea necesario.

4. Simulación Numérica

4.1 ANSYS

Mediante el software de ANSYS se realizaron los análisis correspondientes del modelo, en este caso se cargaron los modelos con los que se realizarán las pruebas, estableciendo las fuentes de luz en las que están presentes cada LED como se muestra en la figura 2, no obstante, al tratarse de varios elementos con características y dimensiones iguales, estos estarán desplazados alrededor del marco de la calavera como se muestra en la figura 3 y finalmente se establecen todos los modelos, obteniendo así lo que se muestra en la figura 4, una vez teniendo todas las fuentes establecidas, cada LED estará representado de la siguiente manera, como se muestra en la figura 5.

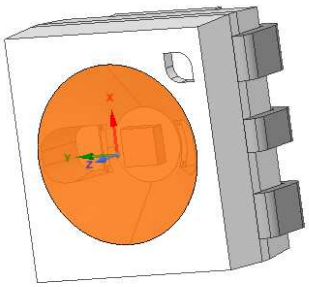


Fig. 2 Modelo digital de un LED

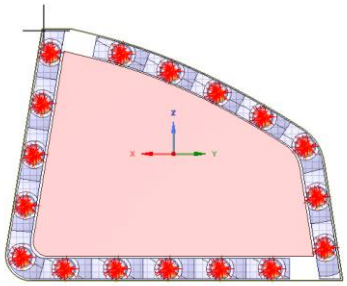
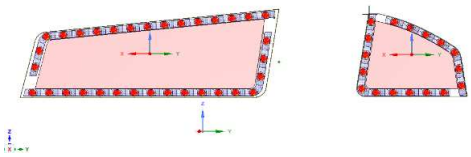


Fig. 3 Primer modelo con fuentes definidas



5.
Fig. 4 Modelo completo con fuentes definidas

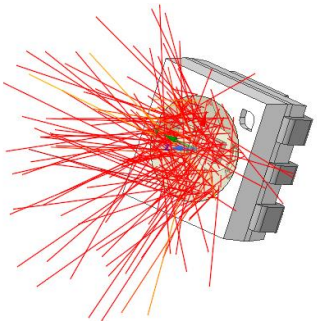


Fig. 5 Fuentes de luz definidas

4.2 ANSYS Speos

En la parte de ANSYS Speos es donde tendremos que realizar nuestra simulación, ya que el software se encarga de realizar el análisis luminoso en nuestra calavera [3].

4.2.1 Sensor de irradiancia

La definición de un sensor en Ansys Speos es un paso crítico para la simulación precisa de la propagación de la luz. Esta herramienta permite una selección directa en la vista 3D, lo que facilita el proceso de configuración., como se visualiza en la Figura 6.

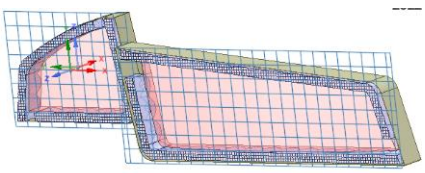


Fig. 6 Sensor de irradiancia establecido

4.2.2 Sensor de intensidad

El sensor de intensidad es una herramienta esencial en la simulación de iluminación, y su función principal es medir la distribución de intensidad en unidades tanto fotométricas (Cd o Lm/sr) como radiométricas (W/sr), proporcionando una representación gráfica detallada de cómo la intensidad lumínica se distribuye en el espacio modelado, como se muestra en la Figura 7.

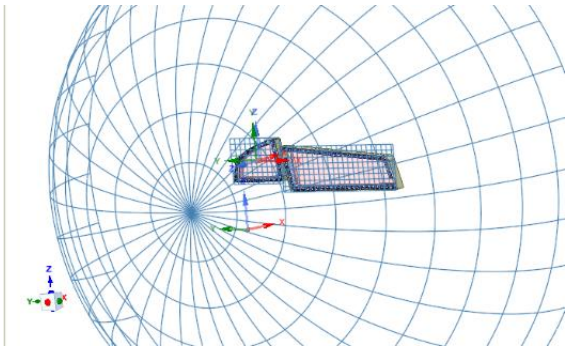
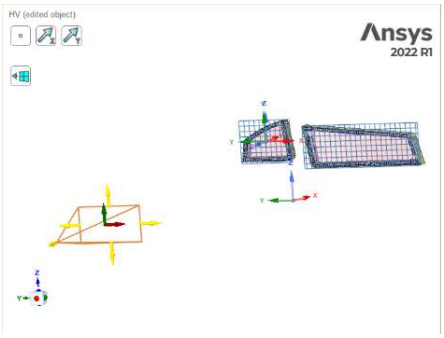


Fig. 7 Sensor de intensidad establecido

4.2.3 Sensor de radiación

La definición del sensor de radiación es un componente esencial en la simulación luminosa, ya que mide la intensidad de la luz en una dirección específica emitida desde una superficie en radiación, expresada en unidades de Watt por estereorradián por metro cuadrado (W/sr/m²) y luminancia en candelas por metro cuadrado (Cd/m²) vistos en la figura 8.



Convergencia Mecatrónica, Capítulo 47, pp. 658 - 666.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

Fig. 8 Sensor de radiación establecido

4.2.4 Tipo de análisis

La Simulación Directa constituye una metodología exhaustiva al llevar a cabo una simulación fotométrica completa. En este proceso, se propaga un elevado número de rayos desde la fuente de luz a través del sistema óptico hasta alcanzar el sensor. La eficacia y precisión de la simulación directa están directamente vinculadas al número de rayos lanzados, un parámetro que se configura considerando todos los sensores integrados en la simulación. Cabe destacar que el tiempo de simulación se ve influido únicamente por la cantidad de rayos y por cómo se propagan a través del sistema. Visualizándose de la siguiente manera en la Figura 9.

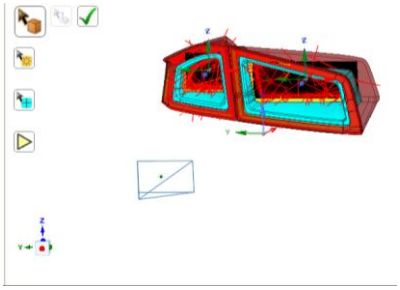


Fig. 9 Visualización del análisis óptico

5. Resultados

Al concluir el análisis, se generan dos documentos esenciales que proporcionan una visión integral de los resultados obtenidos. En primer lugar, se presenta el análisis de la excitación de la pieza, donde se observa cómo el modelo reacciona ante la estimulación de las fuentes de luz. Este análisis permite visualizar la representación real de la pieza desde la perspectiva del modelo como se ve en la figura 10. Como se muestra en la Figura 11, donde se puede apreciar la conjunción de todos los parámetros establecidos en el programa, así teniendo una vista real del modelo simulado.

Convergencia Mecatrónica, Capítulo 47, pp. 658 - 666.
ISBN: 978-607-9394-30-1, 2024.

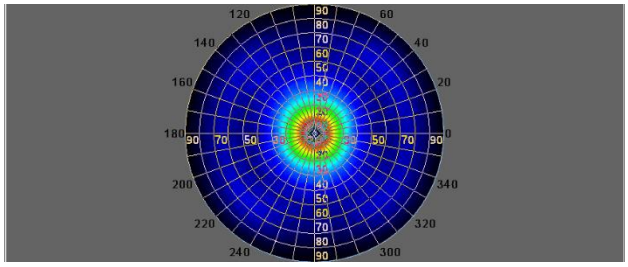


Fig. 10 Resultados de la intensidad luminosa

En la simulación fotométrica (ver Fig. 10), se aprecia una máxima intensidad luminosa de 585.832 candelas (cd), a través de una posición angular Thetta $\theta = 0.893938°$ y un Phi $\varphi = 146.31°$. estos valores tienen refieren a una zona en la que la luz se dirige directamente hacia enfrente con una leve inclinación, lo cual es determinante para valorar la eficacia de la iluminación en distintos ángulos de visión, de igual manera se agrega una tabla (ver Tabla 1) donde se pueden apreciar los resultados de la simulación.

Tabla 1 Resultados de la simulación fotométrica

Parámetro	Valor
Theta (Angulo vertical)	0.893938°
Phi (Angulo horizontal)	146.31°
Intensidad luminosa	585.832

Además, el grafico de la Fig. 10 emplea un filtro para apreciar la representación de la distribución de la luz, resaltando las zonas de mayor intensidad visualmente a través de colores más cálidos (amarillo y rojo), y las zonas de menor intensidad en tonos más fríos (azul)

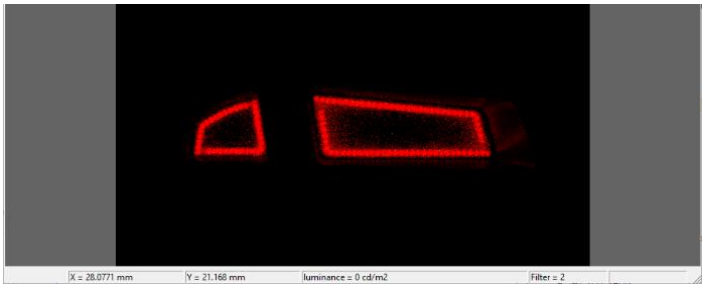


Fig. 11 Visualización real del modelo

Para obtener datos más precisos, se dispone de un archivo adicional generado durante la simulación. Este archivo contiene información detallada, como el análisis de desempeño, el informe de energía y el reporte de error. Estos datos específicos se pueden consultar dando doble clic en el reporte correspondiente. Esta herramienta adicional proporciona una comprensión más profunda de los resultados, permitiendo ajustes y mejoras según sea necesario en el diseño lumínico.

6. Conclusiones

El uso de software de simulación óptica es crucial en la industria actual por diversas razones. Entre ellas destaca su capacidad para la realización de modelos funcionales y analizar el

comportamiento de la luz bajo diferentes condiciones y entornos. Estas herramientas representan una alternativa a diferentes aplicaciones y distintos sectores industriales.

Un diseño eficiente es posible debido a que el software ofrece la posibilidad de realizar pruebas con diversas configuraciones de sistemas ópticos de manera virtual antes de consumir prototipos físicos u otros recursos. Esto facilita la optimización del diseño de manera significativa y así mismo reduce costos de fabricación y las pruebas repetitivas. También se puede esperar la mejora del rendimiento, ya que la simulación óptica permite que los organismos empresariales puedan perfeccionar sus productos como lentes, sensores y sistemas de iluminación. Esto conduce a la creación de productos más eficientes y precisos como se puede observar en la figura 12.

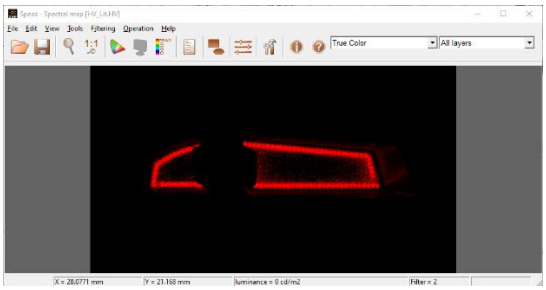


Fig. 12 Opciones de mejora del modelo

La simulación óptica es una herramienta de alta versatilidad que ahorra tiempo y recursos al reducir la necesidad de realizar experimentos físicos en las primeras etapas del desarrollo. Los ingenieros pueden identificar y abordar problemas potenciales antes de la producción, acelerando el ciclo de desarrollo. En sectores con regulaciones estrictas, como la automotriz y la aeroespacial, la simulación óptica garantiza el cumplimiento normativo antes de la fabricación masiva, contribuyendo a la seguridad y eficiencia. En campos avanzados como la óptica para realidad virtual, realidad aumentada y sensores avanzados, el software de simulación es esencial para optimizar sistemas complejos y garantizar una experiencia de usuario óptima.

Referencias

[1] M. Figueras Atienza, *Óptica geométrica La óptica sin ondas*, Universitat Oberta de Catalunya, 2013.

[2] Ansys, “Ansys Space Claim,” Accedido el 24 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible: https://www.ansys.com/products/electronics.

[3] Ansys, “Ansys Speos,” Accedido el 14 de julio de 2023. [En línea]. Disponible: https://www.ansys.com/products/structures/ansys-speos.

[4] SAE International, “Stop Lamps for Use on Motor Vehicles Less than 2032 mm in Overall Width,” febrero 1927. [En línea]. Disponible: https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/005/sae.j586.2000.pdf.

Convergencia Mecatrónica

Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
Prolongación Corregidora Norte No. 168, interior E
Col. El Cerrito, C.P. 76160, Querétaro, Qro.
Distribución en formato digital descargable por internet,
idioma: Español, formato: PDF, pp. 677, Tamaño: 33.6 Mb.

ISBN: 978-607-9394-30-1

ISBN: 978-607-9394-30-1

9 786079 394301