Kaizen y Mecatrónica

Ramos A.J.M

Vargas S.J.E

Kaizen y Mecatrónica

1ª Edición

Ramos Arreguín J.M.
y Vargas Soto J. E.

“Kaizen y Mecatrónica”
Ramos Arreguín Juan Manuel
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, 24 de Noviembre, 2023.

ISBN: 978-607-9394-28-8

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

Índice

Capítulo 1 — 1
Fabricación, programación y validación de dispositivo de medición flexión y pandeo.
Candia García Filiberto, García Sánchez Enrique Rafael, Álvarez Machorro Sergio, Contreras Lima Joel y Navarrete García Mónica.

Capítulo 2 — 14
Fabricación, programación y validación de dispositivo de medición de ruido ambiental.
Candia García Filiberto, Reynoso Romo Juan Ramón, Zaragoza Jr. Víctor Manuel, Ambrosio Lázaro Roberto Carlos, y Vivaldo de la Cruz Israel.

Capítulo 3 — 26
Diseño, selección y estandarización del funcionamiento de los componentes para un prototipo de estación meteorológica automática utilizando una Raspberry Pi 4 y la tecnología IoT en Valle de Bravo, Estado de México.
Rodríguez González José Miguel, Morán Hernández Juan, Vargas Oseguera Liliana Lucero y Terán Soria Arath.

Capítulo 4 — 39
Sistema IoT para monitoreo y control de irrigación de cultivos mediante AWS.
Méndez Guzmán Hugo Antonio, Miranda Tovar Miriam Magali, Martínez Nolasco Juan José y Ángel Hernández Arturo.

Capítulo 5 — 51
Control inalámbrico mediante tecnología IOT para direccionar el movimiento de un motor trifásico de 5hp.
León Zambrano Reyna, Fernando Clemente Covarrubias Velazquez, Marco Antonio Silva de León, Gabriel González de la Rosa, Isaías Torres Campos, Josué Gómez Casas, Carlos Rodrigo Muñiz Valdez y Juan Carlos Ortiz Cuellar.

Índice

Capítulo 6 62
Impulsando el aprendizaje: Interfaz electrónica para simulación de sistemas automáticos.
Hernández Soberón Jesús Arturo, González Medrano Miriam Zulema y Seguy Fernández Claudia Elena.

Capítulo 7 75
Diseño de un robot móvil teleoperado para la fumigación de cultivos.
Mirelez Delgado Flabio Darío, Hernández González Umanel Azazael, Álvarez Montufar Jesus, Caldera Sánchez Marcos Eduardo, Domínguez Sánchez Sergio y Moreno Castro Addried Samir.

Capítulo 8 87
Diseño de botiquín dispensador automático de medicamentos sólidos, mediante uso de sistemas embebidos.
Mirelez Delgado Flabio Darío, Hernández González Umanel Azazael, Rico Mandujano Carlos Daniel, Caballero Varela Montserrat, Pinedo Suárez Rodolfo y Muñoz Frayre Jovana Paola.

Capítulo 9 99
Diseño y desarrollo de un sistema mecatrónico AS/RS empleando cuadricóptero.
Mendoza Vázquez Antonio Raymundo, Torres Méndez Sergio Javier, Mendoza Vázquez José Rafael, Rojas Cuevas Irma Delia y Ramírez Palacios Vicente.

Capítulo 10 114
Diseño mecánico de un robot móvil para aplicaciones de pick and place.
Rasgado Blas Carlos, Mendoza Vázquez José Rafael, Rojas Cuevas Irma Delia y Torres Méndez Sergio Javier.

Capítulo 11 129
Control PID en tiempo real aplicado a un sistema de flujo: una experiencia educativa.
Farfán Martínez Rosalío, Cambrano Bravata Luz del Alba, Hernández Torres Rogelio y De Aquino May Alonso.

Índice

Capítulo 12 142
Modulación PWM para el control de velocidad del motor brushless implementado en un spin coater.
Alejandre Flores Marisol, Hernández Oliva Noemi y Frausto Orozco Leonardo Eldriel.

Capítulo 13 150
Propuesta de sistema mecatrónico para detectar errores en impresión 3D.
Meza Martínez Luis Miguel, Rojas Cuevas Irma Delia, Mendoza Vázquez José Rafael y Sergio Javier Torres Méndez.

Capítulo 14 164
Diseño y comparación de CCN para tareas de reconocimiento en la clasificación del grado de madurez de tomates.
Guerrero Flores Jose Rosario, Olvera Olvera Carlos Alberto, Díaz Flórez Germán, Guerrero Osuna Héctor Alonso y Solís Sánchez Luis Octavio.

Capítulo 15 176
Diseño de un sistema de electromiografía para la evaluación de la salud de los músculos relacionados con la rodilla.
Domínguez Sánchez Sergio, Mirelez Delgado Flabio Darío, Hernández González Umanel Azazael1, Sánchez Rosales Christian Gamaliel, Velasco Ramírez Néstor, Domínguez Sánchez Sergio y Flores Duarte Ana Jazive.

Capítulo 16 185
Fabricación aditiva de filamento para guías quirúrgicas en implantología dental.
López Vázquez Francisco Javier, Guerrero Osuna Hector Alonso, Luque Vega Luis Fernando, Carrasco Navarro Rocío, Solis Sanchez Luis Octavio y Martínez Blanco Ma. del Rosario.

Capítulo 17 198
Medidor de potencia para sistemas embebidos de bajo consumo.
Juárez Ceballos Juan Daniel, Ornelas Vargas Gerardo, Guerrero Osuna Héctor Alonso, Olvera Olvera Carlos Alberto, López Monteagudo Francisco Eneldo y Villagrana Barraza Santiago.

Índice

Capítulo 18 211
Controlador de temperatura PI adaptable difuso para un deshidratador de alimentos.
Hidalgo Leal Héctor Daniel, Martínez Valera Elizabeth, Aquino Bosques Rufino Escobar Cordova Mario Ismael y Morales Gómez Josué Trinidad.

Capítulo 19 226
Mapa interactivo para la localización de los espacios de la UPIIZ.
Arredondo Morales Efraín, López Cazares Ana Paulina y Gonzalez Gallegos Miguel Angel.

Capítulo 20 246
Panel de evaluación para la coordinación viso motriz.
Cruz González Amellalli Ixchel, Coeto Huerta Emilio Alberto, Rojas Rodríguez Rafael, Aburto Cortés Obed y Canchola Chávez Marco Antonio.

Capítulo 21 257
Sistema automatizado de análisis de datos experimentales en la caracterización de guías de onda.
Valencia Hernández Sergio Antonio, Córdova Sánchez Ricardo, Valenzuela Rodríguez Rafael, Silva Barranco Javier, Morales Olán Gema y Moreno Zárate Pedro.

Capítulo 22 275
Sistema de control automático de iluminación.
Hernández Hernández Arturo, Becerra Rodríguez María Blanca, Mata Donjuán Gloria Flor, Dublan Barragán Brenda Santa, Zea Pérez José Marcos y Martínez Badillo Alejandro.

Capítulo 23 289
Monitoreo de infraestructura civil a través de sensores de fibra óptica distribuidos (DFOS).
Martínez Trujano Luis Álvaro, Gasca Zamora Héctor Miguel, David Vázquez Vega, Hernández Figueroa Jorge Alberto, Quintana Rodríguez Juan Antonio y Mediano Martínez Julio César.

Índice

Capítulo 24 306
Diseño e integración de un robot cartesiano para pruebas de trayectorias continuas de corte.
Gregori López Daniel, Torrez Méndez Sergio Javier, Mendoza Vázquez José Rafael, Ramírez Palacios Vicente y Rojas Cuevas Irma Delia.

Capítulo 25 319
Análisis estructural de una silla de ruedas para una movilidad sin asistencia.
Torres González Mauricio, Arriaga Arriaga Cesar Augusto y Gómez Pavón Luz del Carmen.

Capítulo 26 335
Diseño de un mecanismo para la estimación de la distancia en un arreglo binocular estereoscópico.
Flores Mena José Eladio, Michua Camarillo Antonio, Flores Flores Juan Pablo y Aragón Mayo Laura Lidia.

Capítulo 27 350
Dispositivo para diagnóstico de fallas en el sistema eléctrico de remolques vía bluetooth “CheckLight”.
Durán Lugo Juan Miguel, Rodríguez Pérez Manuel Jesús, Uc Ríos Carlos Eduardo, Canto Canul Roberto Carlos, Lozano Casanova María Beatriz y Herrera Rodríguez Cristian Jassiel.

Capítulo 28 364
Diseño y simulación de una cámara de muestreo de contaminantes atmosféricos.
Hernández Zavala Antonio, Sáenz Ramírez David Leonardo y Caraveo Cacep Miguel Antonio.

Capítulo 29 375
Los gemelos digitales, la tecnología innovadora de la Industria 4.0: Aplicaciones y educación en mecatrónica.
Jiménez López Eusebio, Reyes Ávila Luis Alfonso, Martínez Molina Víctor Manuel, Sepúlveda Romo Adrián, Beltrán Márquez Yadira y Luna Bracamontes Alberto.

Índice

Capítulo 30 387
Educación en Ingeniería 4.0 y la mecatrónica.
Jiménez López Eusebio, García Velásquez Luis Andrés, Amavizca Valdez Laura Olivia, Dui Yin Wong Pacheco, Valdez Tribolet Socorro y María del Rosario Mafara Duarte.

Capítulo 31 397
Plataforma experimental de un Robot omnidireccional para control.
Alcaraz Ponce Christofer, Gudiño Lau Jorge, García Herrera Edgar, López Jiménez Luís, Charre Ibarra Saida y Velázquez Acosta Luis.

Capítulo 32 411
Metodología para controlar un aeropéndulo desmontable con un PID.
Antonio Jiménez López, Cristian H. Sánchez Saquín, Alejandro Gómez Hernández y Mario Eduardo Donjuán Carreño.

Capítulo 33 423
Sistema automatizado de malla sombra para hortalizas.
Kenji Davián Chávez Cruz, Cristian Hamilton Sánchez Saquín, Alejandro Gomez Hernández, Tania J. Ortiz Ortiz y Jesús H. Pérez Vázquez.

Capítulo 34 437
Diseño de un laboratorio remoto para el controlador PID de un sistema de carro y aeropéndulo, controlando la velocidad y posición angular.
Diego Ayala Montalvo, Cristian H. Sánchez Saquín, Gabriel R. Hernández Muñoz, Alejandro Gómez Hernández, Daniel Rojo Rivera y Luis M. Villalobos Camacho.

Capítulo 35 456
Desarrollo de un sistema eléctrico para el control de un robot móvil tipo AGV (Automated Guided Vehicle).
Solano Vargas Julio Cesar, Barrera Fernandez Juan Manuel, Manzo Hernández Juan Pablo y Vargas Soto José Emilio.

Índice

Capítulo 36 465
Una revisión general de la aplicación de diferentes tecnologías en sistemas hidropónicos.
Sandoval Castro Daniela Olivia, Vázquez Cervantes Alberto y López Melchor Lebni Zaabdi.

Capítulo 37 481
Optimización topológica por estructuras reticulares en robot submarino para inspección con técnicas no destructivas.
Godínez Trinidad Daniel A., Ramírez Martínez Antonio y Salgado Jiménez Tomas.

Capítulo 38 493
Detección de los impulsos de marcapasos en señales ECG mediante hardware.
Vázquez Ruiz José Ossiel, García Cruz Iván Daniel y Cajiga Soto Jorge Alberto.

Capítulo 39 505
Sensor óptico para detectar fugas de sangre en solución dializante en máquinas de hemodiálisis.
Ruiz Ledesma Carlos Aurelio, Estrada Barojas Cesar Omar y Soto Cajiga Jorge Alberto.

Capítulo 40 516
Uso de un robot neumático como equipo didáctico con actuadores discretos.
Romero Maldonado José Emmanuel, Calixto Zamorano Luis Arturo, Mora Zamora Kenyon Jared, José Luis Avendaño Juárez, Capetillo Reséndiz Guadalupe, Dimas Talavera Velázquez y Juan Manuel Ramos Arreguín.

Capítulo 41 532
Impacto en los alumnos de Ingeniería en tecnologías de automatización sobre el uso de laboratorios de entrenamiento en robótica.
Rojas Sotelo Montserrat, Carreón Jaramillo Daniela Estefanía, Gómez Hernández Alejandro, Contreras Calderón María Guadalupe, Sánchez Saquín Cristian Hamilton y López Cuervo Talía Nayely.

Índice

Capítulo 42 543
Prototipo de bomba de heparina para máquina de hemodiálisis.
Olalde Mendoza Maximiliano, Alvarez Nieves Luis Enrique
y Soto Cajiga Jorge Alberto.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 1, pp. 1 – 13
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Fabricación, programación y validación de dispositivo de medición flexión y pandeo

Candia García Filiberto[1]✉, García Sánchez Enrique Rafael[1], Álvarez Machorro Sergio[2], Contreras Lima Joel[3] y Navarrete García Mónica[1]

[1]Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
[2]Instituto Tecnológico Superior de Ciudad Serdán
[3]Space JLTZ
✉filiberto.candia@correo.buap.mx

Resumen

En las Instituciones de Educación Superior tanto en modalidad presencial como a distancia existe como problemática una débil asociación entre el curriculum conceptual y el curriculum aplicado en materias como mecánica de sólidos o resistencia de materiales. Por ello como alcance se establece el uso y aplicación académica de los prototipos funcionales que permiten la validación de dispositivos que se fabrican con la finalidad de medir, analizar y reportar, el comportamiento de los elementos estructurales esbeltos que conforman la disposición de un chasis, armazón, armadura o estructura, tanto de las construcciones civiles como de la industria metalmecánica, ya sea de funcionamiento estático o móvil. Siendo la flexión o el pandeo un estado o condición de deformación a lo largo del eje de longitudinal que se presenta en los elementos estructurales esbeltos, es de suma relevancia determinar experimentalmente los efectos de una carga perpendicular aplicada en diversas longitudes de una viga o columna esbelta de sección transversal constante. El resultado es una gráfica de la curva de deflexión o de pandeo obtenida de manera experimental en un modelo didáctico instruccional, aportando una experiencia con alta capacidad para su reproducción tanto en la educación presencial como a distancia, con asistencia del profesorado o de manera autodidacta, que permite asociar el conocimiento conceptual y aplicado de programas de asignatura que requieren un apartado experimental.

Palabras clave: Adquisición de señales, Análisis de datos, Deflexión, Pandeo.

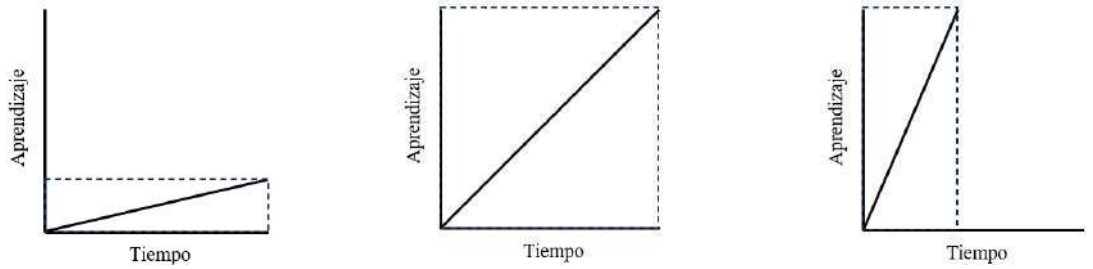
1. Introducción

Como antecedente este trabajo se inserta dentro del marco de acción del programa XXVIII Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico 2023, donde se proporciona a los estudiantes de diversas Instituciones de Educación Superior (IES) nacionales e internacionales la oportunidad y experiencia de vivir el desarrollo de nuevos conocimientos y de la ciencia y tecnología de manera cercana con expertos en diversos temas de innovación y desarrollo que buscan la sustentabilidad de las naciones a través de la autonomía y soberanía [1], que brinda el registro de patentes y el registro de los derechos de autor y propiedad industrial y que forman parte de la industria 4.0.

Una problemática latente de los países en vías de desarrollo es que su producción se cataloga de baja calidad, debido a que los procesos de fabricación y manufactura se configuran por una gran diversidad de tecnología que proviene de diversos países. Aspecto que implica ajustar normativas, ajustes, tolerancias, procedimientos, entre otros aspectos, por lo tanto, la productividad tiene un alto porcentaje de desperdicio (*scrap*) y productos que no cumplen con las expectativas del cliente. La integración no planeada de las empresas productivas trae como consecuencia que la mayoría de los recursos destinados a la productividad de las empresas se destinen a las actividades de mantenimiento o adaptación de las líneas de producción. Siendo la falta de inversión en investigación y desarrollo en

la innovación o creación de nuevos productos un área o departamento que no atiende de manera pertinente.

La presente intención para la fabricación, la programación y la validación de un dispositivo de medición de flexión en elementos estructurales esbeltos, se justifica ante la necesidad de contar con un pleno dominio de las materias formativas como Diseño Mecánico o Mecánica de Sólidos, que trae como beneficio una rápida y exponencial curva de aprendizaje que apoya los procesos de aplicación o implementación de la ciencia y la tecnología a las problemáticas que limitan el desarrollo sostenible de las comunidades, regiones, los estados y la nación. Por ello, el desarrollar desde la escuela dispositivos que permitan emular o simular las áreas o departamentos que propician el desarrollo de tecnología propia, estas a futuro pueden configurar líneas productivas estandarizadas, que incrementan la producción y el grado de calidad.



Aprendizaje sin apoyos didácticos (lento) | Aprendizaje mediado por asistencia docente (proporcional) | Aprendizaje exponencial, con apoyo de prototipos didácticos

Figura 1. Curvas de aprendizaje. Fuente: Desarrollo propio.

Siendo el objetivo de este documento exponer la experiencia en la fabricación de dispositivos mecatrónicos de tipo multidisciplinario, que tienen el alcance para realizar: la medición, el análisis y el reporte del comportamiento de los elementos estructurales esbeltos que conforman la disposición de un chasis, armazón, armadura o estructura, en el sector industrial, ya sea de tipo infraestructura productiva o como producto para el usuario final.

Desarrollar un prototipo funcional implica, hacer uso de las recomendaciones del método científico; observar, preguntar, realizar una hipótesis, la experimentación, el análisis y las conclusiones, que se alinea con los principios la heurística como disciplina científica.

Durante el desarrollo se requiere del conocimiento, comprensión y aplicación de los conocimientos que explican, tanto de manera conceptual, como analítica, los fenómenos como la deformación y el esfuerzo, que se presentan en las estructuras cuando trabajan en los estados límites con referencia en la curva esfuerzo-deformación (figura 1).

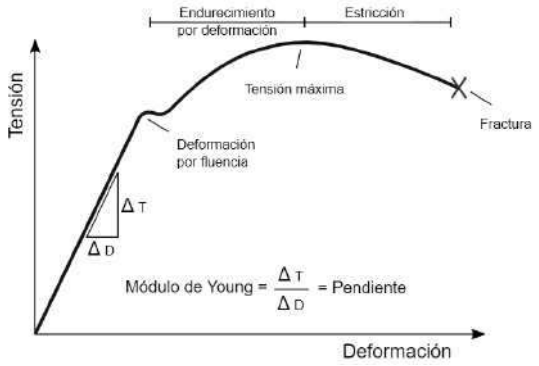


Figura 2. Curva esfuerzo-deformación. Fuente: Tomada de [2].

A continuación, se describen los términos que explican los comportamientos a estudiar. Con ayuda de la internet de la información y algunos libros se realizaron las definiciones de “flexión, deflexión y pandeo [3], [4], [5], [6].

1.1 Definiciones

El termino flexión [3] se define como el comportamiento de una viga o elemento estructural cuando se somete a cargas que provocan deformaciones en forma de curvatura, cuando está sometida a una carga que actúa perpendicularmente a su eje longitudinal, se produce una flexión, esto resulta en curvatura y deformación en la viga, donde una región se comprime y otra región se alarga (figura 3). En cuanto a la deflexión esta se define como la medida de la desviación o curvatura que se produce en un elemento estructural como resultado de las fuerzas aplicadas, ya sea puntuales, distribuidas o de momento [3], la fórmula exacta de la deflexión se determina por la ec. 1 [4].

$$y_{max} = -\frac{F*l^3}{192*E*I} \tag{1}$$

Donde:

- y_{max} es la deflexión máxima
- F es la fuerza aplicada al centro de la viga
- l es longitud de la viga
- E es el módulo de elasticidad del material de la viga
- I es el momento de inercia para vigas de sección continua

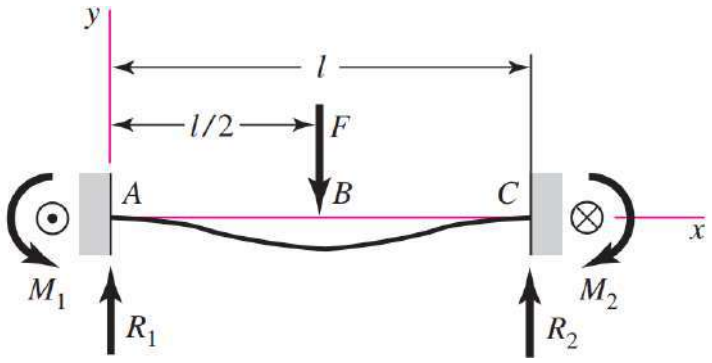


Figura 3. Deflexión en configuración doblemente empotrada y carga central. Fuente: Tomada de [4]..

El pandeo, se define como la deformación grande y repentina provocada por un pequeño incremento de una fuerza de compresión existente [5]. La fórmula general (ec. 2) utilizada para calcular la carga crítica de pandeo en una columna idealizada y recta es la fórmula de Euler [3] para una configuración doblemente empotrada (figura 4).

$$P_{cr} = \frac{4*\pi^2*E*I}{L^2} \tag{2}$$

Dónde:

- P_{cr} es la carga crítica de pandeo.
- E es el módulo de elasticidad del material de la columna.
- I es el momento de inercia de la sección transversal de la columna con respecto al eje de pandeo.
- L es la longitud libre efectiva de la columna.

En conjunto con la carga crítica la ecuación de la secante para columnas doblemente empotradas (figura 4) se utiliza para determinar la máxima deformación que provoca la carga crítica y que se obtiene por el análisis de Euler [6]. El valor de la deflexión máxima se obtiene para una columna con carga excéntrica de una forma alternativa como se muestra en la ec. 3.

$$y_{max} = e\left(\sec\frac{\pi}{2}\left(\sqrt{\frac{P}{P_{cr}}} - 1\right)\right) \tag{3}$$

Donde:

- y_{max} es la deflexión máxima
- P es la fuerza aplicada a la columna
- *e* es la excentricidad en la cual se aplica la carga
- P_{cr} es la carga crítica de pandeo.

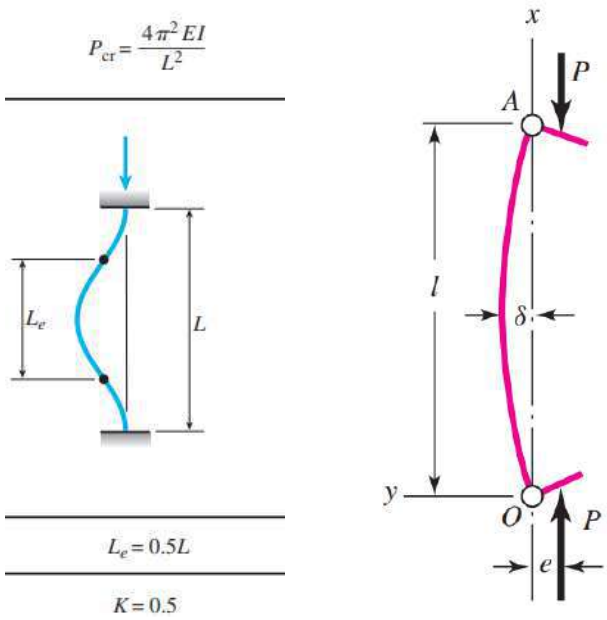


Figura 4. Configuración columna doblemente empotrada: carga crítica y ecuación de la secante. Fuente: Tomada de [3] y [4] respectivamente.

Los elementos de medición llamados *strain gage* o galgas extensiométricas, se emplean para la detención de la tensión por medio una señal eléctrica, donde la tensión es una cantidad de la deformación - elongación o contracción de un material en proporción a la fuerza externa aplicada [7]. El material al tener una reacción, este cambia su resistencia eléctrica a media que se va deformando, las *strain gage* aprovechan dichas propiedades para realizar lecturas de los materiales y la deformación que actúa en ellos

La cantidad de resistencia eléctrica que proporciona la *strain gage* es inversamente proporcional al área de la sección transversal y proporcional a la longitudinal. Por lo cual nos da como resultado que tanto el alargamiento como la contracción de estos materiales, el cambio es proporcionalmente a la resistencia eléctrica del material con una constante especifica. Estos cambios producidos por el material, las galgas extensiométricas extraen los valores resistivos y los convierten en valores de voltaje que a su vez se amplifica por medio de un circuito puente, dado que el voltaje es muy pequeño y es expresado μV, el circuito puede amplificar de 5000 a 10000 veces más de lo habitual.

La longitud de las *strain gage* suele variar dependiendo de material a estudiar o del uso que se le dará y estas pueden ser:

- Concreto o Mortero: 30-120 mm
- Madera y vidrio: 5-30 mm
- Metal común o acrilico: 1- 6 mm

Su resistencia varia dependiendo del uso que se le quiera dar y eso depende de lo siguiente:

- Compensacionde deflexion: 60Ω
- La medición de deformación de propósito general: 120Ω
- Para transductores: $350 - 1000\Omega$

Para contar con una medida precisa de las *strain gage* se utiliza el puente de Wheatstone, que se utiliza de varias formas con la finalidad de medir la resistencia eléctrica [8] de las cuales son:

- La determinación del valor absoluto de una resistencia en comparación con una resistencia conocida
- Para la determinación de los cambios relativos en la resistencia (este último método se utiliza en técnicas para el uso de galgas extensiométricas).
- Permite medir con gran precisión cambios relativos de resistencia en la galga extensiométrica, que suelen ser del orden de 10^{-4} a 10^{-2} Ω/Ω.

El resultado obtenido es la validación de la propuesta de un prototipo funcional que se emplea como un modelo didáctico instruccional que determina la flexión de una viga o el pandeo de una columna, que representan estados o condiciones de deformación a lo largo del eje de longitudinal y que se presentan de manera común y con frecuencia con alto riesgo de falla en los elementos estructurales esbeltos de sección transversal constante. La validación se realiza mediante una gráfica comparativa de la curva de deflexión entre los métodos analíticos y la determinación experimental.

Al mismo tiempo, al ser sistemático el procedimiento, es posible replicar la experiencia hacia los estudiantes del área de ingeniería. Por ello, el alcance de este trabajo tiende a propiciar mejoras en el sector industrial debido a la formación en innovación y desarrollo tecnológico que el estudiante encuentra y vive desde su formación académica.

Se concluye que con una actitud y vocación hacia la investigación que se promueven mediante los programas como: XXVIII Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico 2023. Es posible contar con dispositivos capaces de medir, analizar y reportar, el comportamiento de los elementos estructurales que conforman la disposición de un chasis, armazón, armadura o estructura, tanto de las construcciones civiles como de la industria metalmecánica, ya sea de funcionamiento estático o móvil. Para con ello, incentivar educación heurística de forma autodidacta y al mismo tiempo promoverse como tecnólogo dentro de la comunidad académica.

2. Método

La metodología es cuantitativa, debido a que el análisis es analítico, el método es científico, el procedimiento es secuencial, la técnica es experimental, las herramientas son software de adquisición, tratamiento y procesamiento de datos y los formatos de presentación de resultados gráficas en función del tiempo y en función de la deflexión, el procedimiento secuencial didáctico se presenta en la figura 5 y el marco conceptual pedagógico se observa en la figura 6. Asimismo, los *scripts* y diagramas utilizados se pueden consultar en el link: https://drive.google.com/drive/folders/1I5IrkthIkJff8aiUk20KEH0L_zG6y0Z1.

Desde la perspectiva pedagógica se considera que las categorías de análisis son las habilidades cognitivas entendidas como: las habilidades cognitivas que son aquellas que permiten al individuo conocer, pensar, almacenar información, organizarla y transformarla hasta generar nuevos productos, realizar operaciones tales como establecer relaciones, formular generalizaciones, tomar

determinaciones, resolver problemas y lograr aprendizajes perdurables y significativos. Para la propuesta didáctica se utilizaron las subcategorías de análisis: recordar, entender, aplicar, analizar, sintetizar y evaluar a partir de la taxonomía de Bloom [9].

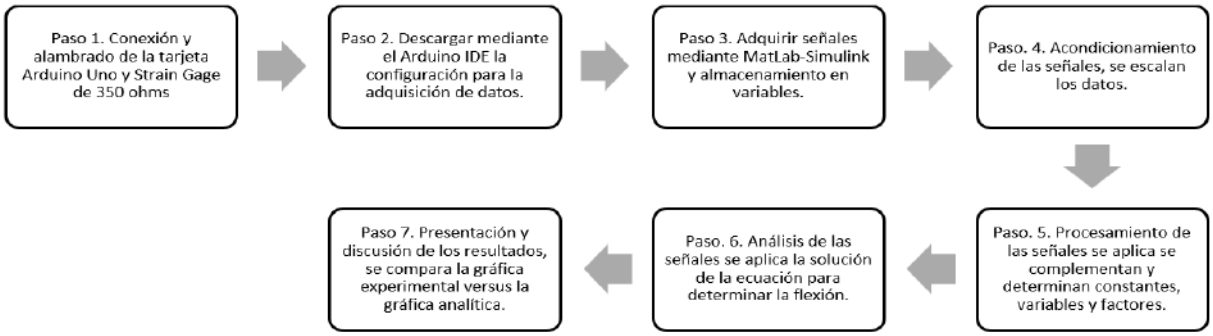


Figura 5. Procedimiento secuencial didáctico. Fuente: Desarrollo propio.

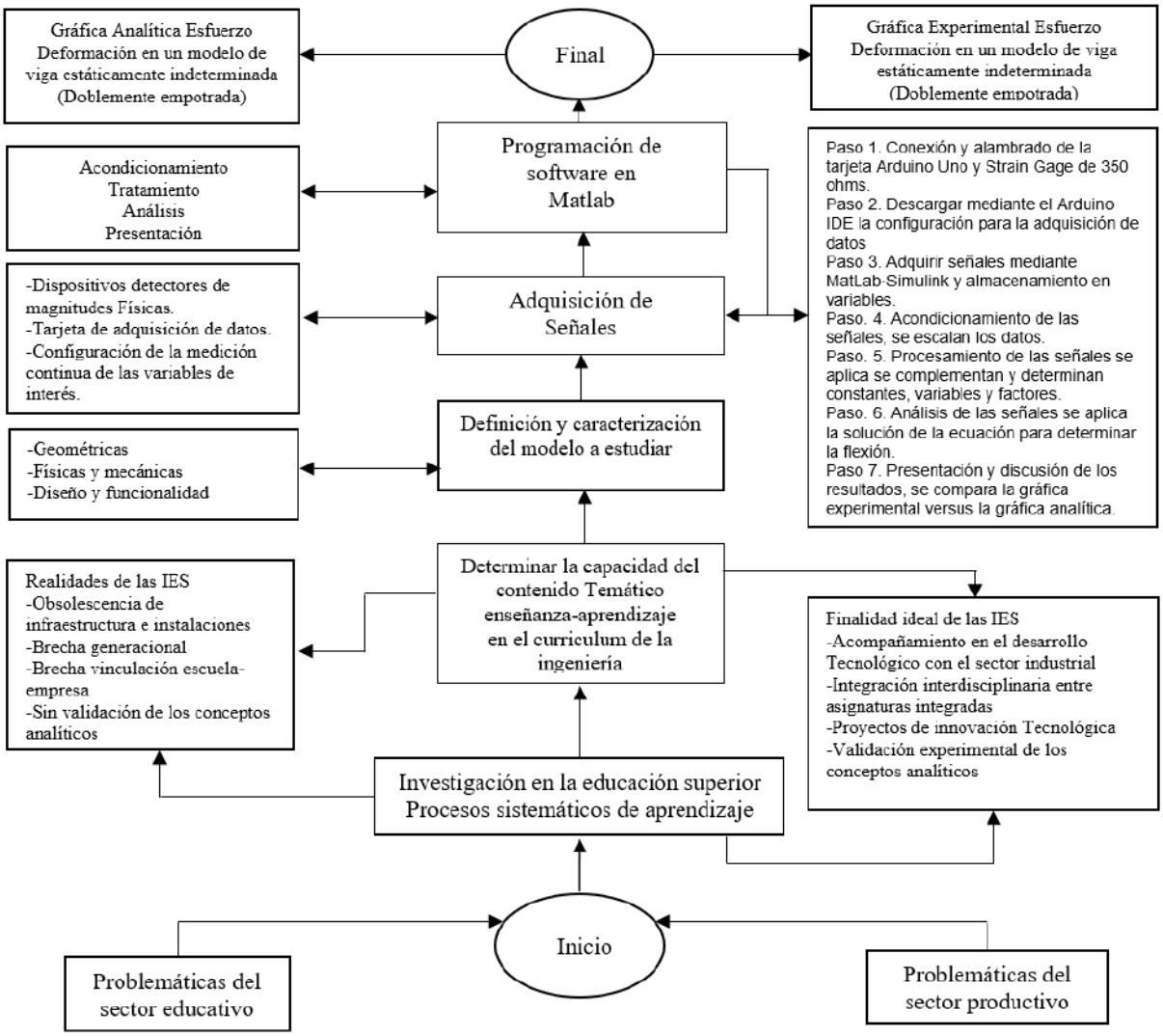


Figura 6. Marco conceptual pedagógico. Fuente: Desarrollo propio.

2.1 Modelo de estudio

Las mediciones se realizan a través de una galga extensiométrica (Strain Gage) que comercialmente se conoce como uniaxial KFGS-2-120 [10]. Se utiliza un transductor de tipo un cuarto de puente de Wheatstone (figura 7).

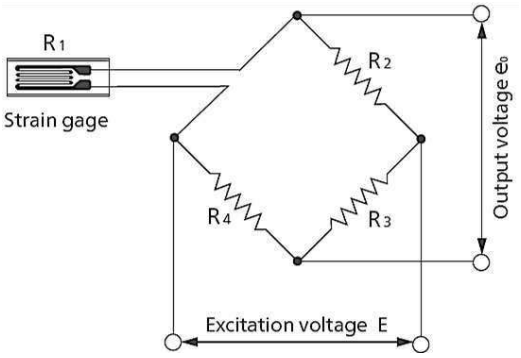


Figura 7. Configuración de modelo de estudio. Fuente: Tomada de [8].

Para adquirir y acondicionar las señales de voltaje se utiliza un transductor tipo BF350-3AA (figura 8), con las siguientes características [11]:

- Resistencia: 349.8 ±0.1Ω
- Coeficiente de sensibilidad (factor de calibre): 2.0 – 2.20
- Clase de precisión: 0.02
- Límite de deformación: 2,0 % (2000 macro deformación)
- Tamaño monolítico: 7.1 mm * 4.5 mm

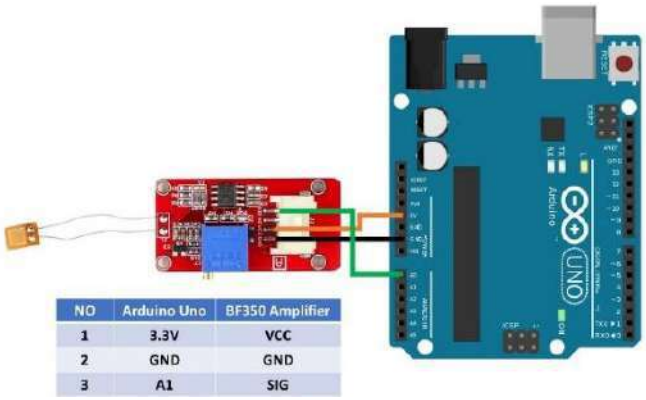


Figura 8. Conexión transductor-Arduino Uno. Fuente: Tomada de [11].

Entre las cualidades del modelo de estudio, tanto en las mediciones de pandeo y deflexión, se encuentra que es configurable a modelos tipo: viga o columna simplemente apoyada, simplemente empotrada, doblemente empotrada o articulada, entre otros posibles. Las figuras 9 y 10 muestran los modelos de estudio en escala real.

El *Script* principal realizado en Matlab, para la adquisición, análisis y presentación de las señales proporcionadas por los *Strain gage* se muestra a continuación:

Script Deflexión

```
%Datos Galga
load("FLEXION2TORNILLOS.mat")
bkgrnd=imread('vigabiempdist.jpg');
subplot(4,1,1),imshow(bkgrnd),title('Mo
delo en Estudio');
x=t;
v1=y;
Vo=(v1.*-1) %Voltaje de salida medido
Vex=5 %Voltaje de alimentación
GF=2.1 %Factor de Galga
Eun= (Vo/Vex)*(-1*GF)
Euni=Eun.*10^-3
Euni=Euni'
subplot(4,1,2),plot(t,y),title('Lectura
Continua de Voltaje del Strain Gage');
grid;
subplot(4,1,3),plot(t,Euni),title('Conv
ersión a Deformación Unitaria');
grid;
Emax=max(Euni)
Emin=min(Euni)
if abs(Emax)>abs(Emin)
Duni=abs(Emax)
else
    Duni=abs(Emin)
end
b=12
d=0.56
L=305
P=0.364
a1=150.5
b1=150.5
Ea=20394.15 %kg/mm^2
c=0.28
I=((b*d^3)/12)
Duni=Duni
Esf=Duni*Ea
Mflex=(Esf*I)/c
P=(Mflex*L^3)/(2*(a1^2)*(b1^2))
Deflex=((P*(a1^3)*(b1^3))/(3*L^3*Ea*I))
vert=[0 -Deflex 0]
horz=[0 1/2*L L]
subplot(4,1,4),plot(horz,vert),title('D
eflexión Máxima')
grid
```

Script Pandeo

```
%DatosGalga
load("PANDEO.mat")
bkgrnd=imread('Columna.jpg');
subplot(1,4,1),imshow(bkgrnd),title('Mo
delo en Estudio');
x=t;
v1=y;
Vo=(v1.*-1) %Voltaje de salida medido
Vex=5 %%Voltaje de alimentación
GF=2.1 %Factor de Galga
Eun= (Vo/Vex)*(-1*GF)
Euni=Eun.*10^3
Euni=Euni'
subplot(1,4,2),plot(y,t),title('Lectura
Continua de Voltaje del Strain Gage');
grid;
subplot(1,4,3),plot(Euni,t),title('Conv
ersión a Deformación Unitaria');
grid;
Emax=max(Euni)
Emin=min(Euni)
b=12
d=0.56
L=305
P=0.364
a1=150.5
b1=150.5
Ea=20394.15 %kg/mm^2
c=0.28
I=((b*d^3)/12)
A=b*d
K=0.5
r=sqrt(I/A)
Esfy=253000 %kg/mm2
Cc=sqrt((2*pi^2*Ea)/Esfy)
Pcr=(pi*Ea*I)/(0.25*L^2)
FS=(5/3)+((3*(L/r))/(8*Cc))-
((L/r)^2/(8*Cc^3))
Esf=((1-((K*L)/r^2)/(2*Cc^2))*Esfy)/FS
e=50
Deflex=(e*(sec((sqrt(P/Ea*I)*(L/2))-
1)))
horz=[0 -Deflex 0]
vert=[0 1/2*L L]
subplot(1,4,4),plot(horz,vert),title('D
eflexión Máxima')
grid
```

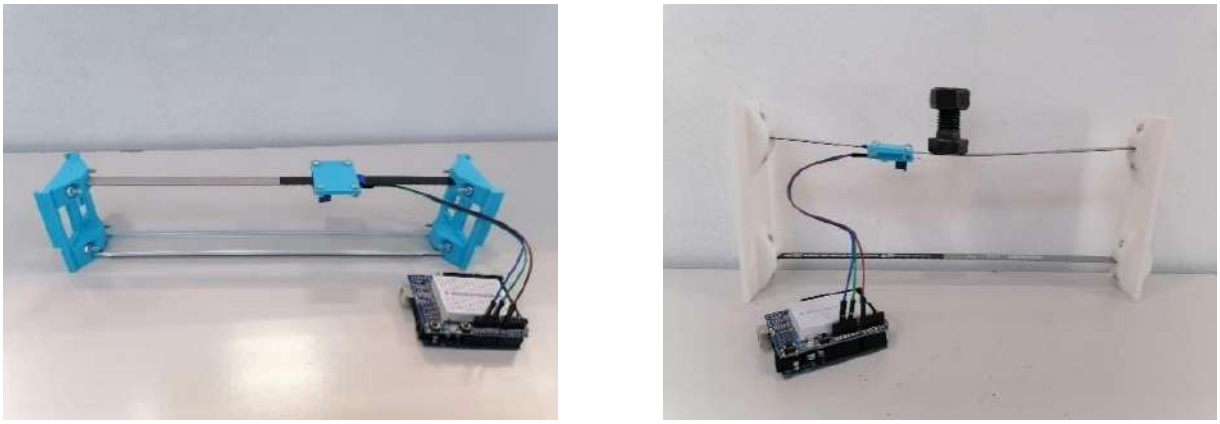


Figura 9. Configuración de modelo de estudio deflexión en vigas. Fuente: Desarrollo propio.

Figura 10. Configuración de modelo de estudio pandeo en columnas. Fuente: Desarrollo propio.

3. Resultados

Dar continuidad a la factibilidad de los prototipos funcionales con la capacidad de verificar los resultados y ejemplificaciones analíticas desde la escuela, es una estrategia de alto impacto que proporciona características de mejora e innovación en los dispositivos dedicados al proceso de aprendizaje y por consiguiente acumulan un vasto conjunto de conocimientos y experiencias que configuran diversos escenarios de enseñanza.

Los temas de flexión vigas y pandeo en columnas, son parte esencial de la asignatura de mecánica de sólidos. Materia que es de tipo formativo en la licenciatura en ingeniería de las IES, debido a que los contenidos temáticos que se estudian permiten comprender el comportamiento de los elementos estructurales ante la presencia de restricciones o cargas de diversos tipos.

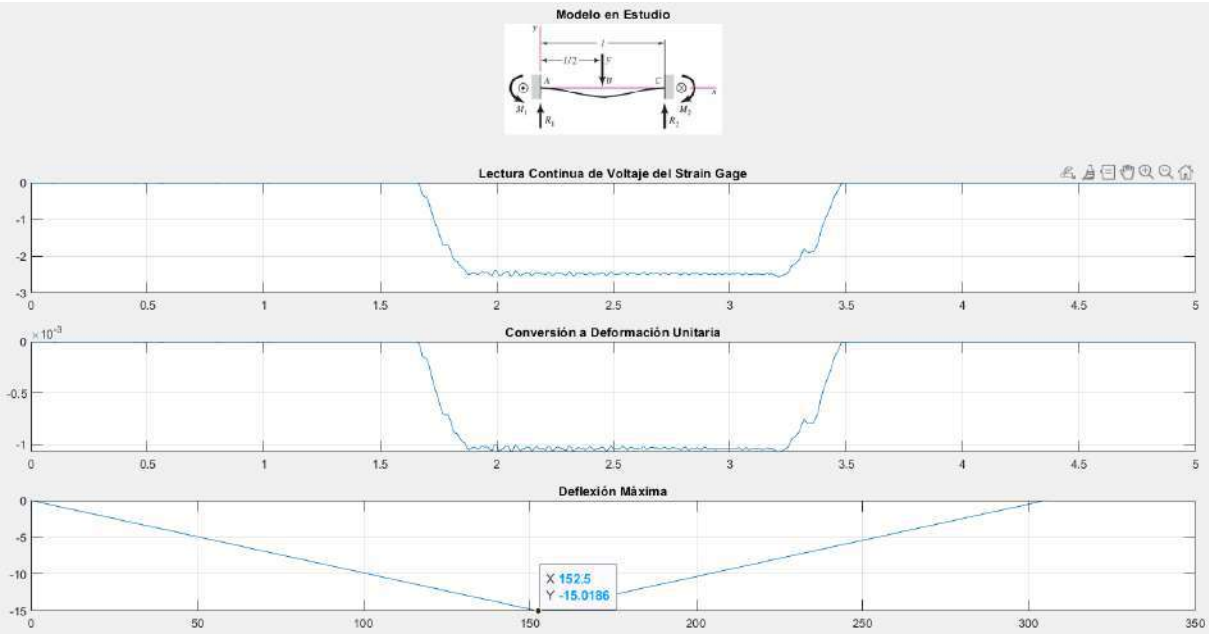


Figura 11. Comparativa de gráficas de flexión. Fuente: Desarrollo propio.

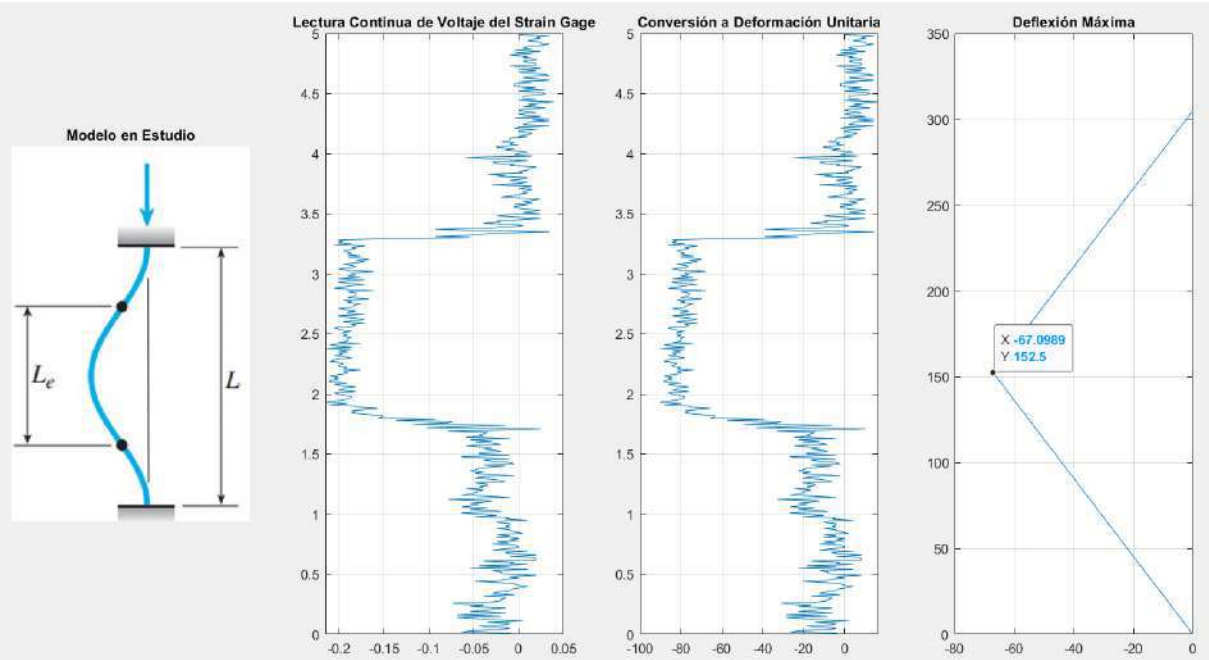


Figura 12. Comparativa de gráficas de pandeo. Fuente: Desarrollo propio.

.

La tabla 1, es la síntesis de los valores de flexión y pandeo que se comparan entre los resultados obtenidos de manera experimental en las figuras 11 y 12, con respecto al procedimiento de la figura 6. La comparativa se lleva a cabo entre la gráfica de la lectura continua de voltaje en volts de *la Strain gage* una segunda gráfica es la conversión de voltaje a deformación unitaria sin unidades y finalmente la conversión a la gráfica de deflexiones máximas en unidades de milímetros.

Tabla 1. Comparativa cualitativa flexión y pandeo. Fuente: Desarrollo propio.

Característica	Deflexión y Pandeo experimental	Observaciones
Lectura continua *Strain Gage*	Se observa de manera específica en el rango de tiempo especificado el cambio de forma del elemento estructural	Se comprende y asocia en el modelo gráfico y en el experimental la representación de la aplicación de la carga y las restricciones
Conversión a voltaje y escalado de la Señal	Para la instrumentación de elementos estructurales el escalado de la señal es una operación indispensable y compleja, que requiere de una clara conceptualización de la conversión analógica a digital	Se expande el, alcance de los dispositivos académicos, mediante la aplicación de los principios de la conversión analógica digital
Deflexión análisis de la señal	El valor obtenido es continuo y lineal y cambia en función de la longitud de acuerdo con la cercanía de la carga aplicada, la precisión depende de la capacidad de adquisición de datos de la tarjeta Arduino Uno	Se comprenden por observación directa los conceptos valores discretos y valores continuos
Logro personal	Acercarse a la instrumentación de elementos estructurales desde la escuela, es una oportunidad que fomenta la capacidad para el análisis y determinación experimental de los esfuerzos y deformaciones en complejas estructuras tanto civiles como industriales.	

Este trabajo de investigación aplicada con enfoque a la transferencia tecnológica es una experiencia sistémica que puede ser replicada, con alta efectividad bajo un enfoque de enseñanza dirigido (apoyo docente) o de autoaprendizaje (sin apoyo docente).

Al representar el prototipo funcional una oportunidad formativa complementaria al curriculum de las licenciaturas en ingeniería, su contribución innovadora radica en la capacidad para detonar y potencializar las habilidades cognitivas [9] del ejecutor (alumno o docente), al reproducir la experiencia, la modificación de las capacidades cognitivas se menciona a continuación:

- Reconoce, mediante manipulación (arma, mide y ajusta modelos) la representación física de los términos y conceptos, tanto analíticos como abstractos.
- Comprende, las relaciones asociadas (esfuerzo-deformación) a cambios de forma y propiedades físicas y mecánicas, que afectan la funcionalidad de los elementos estructurales.
- Memoriza, condiciones de estado seguro e inseguro, de estabilidad e inestabilidad en elementos estructurales esbeltos.
- Asocia, el comportamiento lineal o no lineal de los elementos estructurales esbeltos con la gráfica esfuerzo deformación del material.
- Reproduce, a escala de manera formal la instrumentación de elementos estructurales esbeltos.
- Mejora, las configuraciones y características de los modelos estructurales ante cargas y restricciones simples o complejas.
- Sintetiza, los comportamientos observados y los relaciona mediante coeficientes o factores experimentales, que simplifican el diseño sin sacrificar seguridad o eficiencia.
- Evalúa, la precisión y exactitud de los modelos analíticos con los modelos experimentales.
- Innova, en las configuraciones estructurales que proporcionan la mejor relación esfuerzo-deformación con altos factores de seguridad, sin exagerar el factor costo económico.

4. Conclusiones

Durante la experiencia en investigación aplicada que se desarrolló en el marco del XXVIII Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico 2023, fue posible fabricar y poner en operación un prototipo funcional con la capacidad para medir, analizar y reportar, el comportamiento a flexión o pandeo de los elementos estructurales que conforman la disposición de un chasis, armazón, armadura o estructura, tanto de las construcciones civiles como de la industria metalmecánica.

Este prototipo tiene como alcance ser utilizado para la enseñanza de las asignaturas formativas en la curricula de las licenciaturas en ingeniería. Asignaturas que implican amplio contenido analítico tanto en los conceptos que definen los fenómenos físicos, como en las relaciones que proporcionan la solución ante diversos tipos o escenarios que configuran condiciones operativas normales o de falla, ya sea aún no significativa o catastrófica.

Tomar conciencia de la asociación entre las condiciones operativas de una estructura y los efectos que se generan al sobrepasar las propiedades; geométricas, físicas o mecánicas de esta. Es una experiencia y conocimiento deseable que refuerza la formación en ingeniería y proporciona como cualidad una alta capacidad para determinar el comportamiento de los elementos estructurales esbeltos ante cargas que producen flexión o pandeo.

Como reflexión final ha sido relevante observar que los estudiantes que participarón en este proyecto, manifestarón una alta motivación hacia la validación de la parte conceptual de las asignaturas como la mecánica de sólidos, posterior a la motivación su actitud tránsito hacia el compromiso personal para explicar los resutlaods de las formulaciones analíticas a través de la manipulación experimental de prototipos didácticos.

Referencias

[1] Secretaría de Gobernación, «Diario Oficial de la Federación,» 18 11 2022. [En línea]. Available: https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPEUM.pdf. [Último acceso: 24 11 2022].

[2] Wiki LIC, «Diagrama tensión-deformación de un material dúctil,» 23 julio 2023. [En línea]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stress_Strain_Ductile_Material_es.svg.

[3] F. Beer, E. Russell, J. DeWolf y D. Mazurek, Mecánica de Materiales, Mc Graw Hill, 2009.

[4] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica, Mc Graw Hill, 2008.

[5] V. Díaz de León, V. González, J. Rosete y N. Díaz de León, Mecanica de Materiales Teoria y Apliaciones, Grupo Editorial Patria, 2018.

[6] J. Gere y B. J. Goodno, Mecanica de Materiales, Cengage Learning, 2016.

[7] J. E. Pope, SOLUCIONES PRACTICAS PARA EL INGENIERO MECANICO, MCGRAW-HILL, 2001.

[8] K. E. Instruments., «What's a Strain Gage,» 7 julio 2023. [En línea]. Available: https://www.kyowa-ei.com/eng/technical/strainbasic_course/index.html#utm_source=catalog_straingagefirst&utm_medium=LP&utm_campaign=catalog_straingagefirst.

[9] H. B. &. Kjær, «The Wheatstone Bridge Circuit Explained,» 21 junio 2023. [En línea]. Available: https://www.hbkworld.com/en/knowledge/resource-center/articles/2023/strain-measurement-basics/strain-gauge-fundamentals/wheatstone-bridge-circuit#!ref_www.hbm.com.

[10] M. Frías, Y. Haro y I. Artiles, «Las habilidades cognitivas en el profesional de la Información desde la perspectiva de proyectos y asociaciones internacionales,» *Investigación Bibliotecológica,* vol. 31, nº 71, pp. 201-218, 2017.

[11] Kyowa, «Strain Gages,» 02 julio 2023. [En línea]. Available: https://www.kyowa-ei.com/eng/file/download/technical/strain_gages/pdf_index_001_eng.pdf.

[12] InnovatorsGuru, «Strain Gauge Sensor,» 02 julio 2023. [En línea]. Available: https://innovatorsguru.com/strain-gauge-sensor/.

[13] F. Hidalgo, «Analisis Experimental de Esfuerzos y Aplicaciones con Galgas Extensiometricas,» Universidad Autonoma de Nuevo León , 1995.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 2, pp. 14 – 25
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Fabricación, programación y validación de dispositivo de medición de ruido ambiental

Candia García Filiberto[1]✉, Reynoso Romo Juan Ramón[2], Zaragoza Jr. Víctor Manuel[2], Ambrosio Lázaro Roberto Carlos[1] y Vivaldo de la Cruz Israel[1]

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

Resumen

El ruido ambiental es una problemática asociada en toda empresa de la industria metal mecánica que produce diversas afectaciones en la precisión de los procesos y procedimientos de ensamble de los elementos estructurales que conforman la disposición de un chasis, un armazón, una armadura o una estructura, ya sea de funcionamiento estático o móvil. Siendo el ruido ambiental un fenómeno que puede ser asociado a la resonancia y la perdida de rigidez por efecto de cargas armónicas que se presentan en los elementos estructurales esbeltos. Es de suma relevancia determinar experimentalmente desde el área académica los efectos y cambios que se generan en la frecuencia fundamental por una excitación armónica de amplitud constante aplicada a una columna esbelta de sección transversal constante. Al validar la fabricación y prototipo de medición de ruido ambiental el resultado es una gráfica comparativa de la respuesta dinámica determinada de manera experimental en un modelo didáctico de fácil reproducción académica.

Palabras clave: Adquisición de señales, Análisis de datos, Rigidez estructural, Vibraciones mecánicas.

1. Introducción

Este trabajo se inserta dentro del marco de acción del programa XXVIII Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico 2023, que proporciona a los estudiantes de diversas Instituciones de Educación Superior (IES) nacionales e internacionales la oportunidad y experiencia de vivir el desarrollo de nuevos conocimientos en el avance de la ciencia y tecnología de manera cercana con académicos investigadores en diversos temas de innovación y desarrollo que buscan la sustentabilidad de las naciones a través de la autonomía y soberanía mediante el desarrollo tecnológico que tiene la capacidad para solicitar el registro de patentes y derechos de autor y de la propiedad industrial, que son productos académicos y evidencia de una pertinente enseñanza de la educación superior aplicada [1].

En los países que se encuentran en desarrollo se identifica una problemática persistente, que está relacionada con la percepción de que su producción académica se caracteriza por ser teórica y con baja relación a la aplicación industrial. Este problema se debe en gran medida a que el sector productivo depende de una composición heterogénea de herramientas y tecnología provenientes de diversos países que han alcanzado un alto desarrollo económico. Como resultado de esta dependencia tecnológica en los sectores productivos, se requieren ajustes y modificaciones diferentes; con normativas, adaptaciones, tolerancias y procedimientos variados, lo cual generan alteraciones que afectan la productividad y resultan en un alto porcentaje de desperdicio y productos que no cumplen con las expectativas establecidas. La ausencia desde la academia de una integración planificada con la industria y la productividad académica aplicada implica que una parte significativa de los recursos se destine al mantenimiento y adaptación de las líneas de producción, descuidando otros departamentos,

como el desarrollo, la innovación o la creación de productos, que podrían impulsar un crecimiento económico sostenible y mejorar la calidad de los productos.

La necesidad de fabricar, programar y validar un dispositivo de medición de flexión en elementos estructurales delgados se justifica por la importancia de adquirir un profundo conocimiento en áreas fundamentales como Vibraciones Mecánicas o Mecánica de Sólidos. Este conocimiento conlleva numerosos beneficios, entre ellos, una rápida curva de aprendizaje (figura 1), que respalda la aplicación e implementación de la ciencia y la tecnología para abordar desafíos que obstaculizan el desarrollo sostenible de comunidades, regiones, estados y el país en su conjunto. Por tanto, resulta crucial fomentar desde etapas tempranas en el ámbito educativo la creación de entornos que permitan simular y emular departamentos o áreas que impulsen el desarrollo de tecnología propia. Estos dispositivos podrían establecerse como líneas de producción estandarizadas, impulsando así el crecimiento económico y tecnológico de la nación.

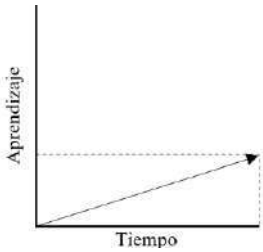


Figura 1a. Curva de aprendizaje sin apoyo (lento). Fuente: Desarrollo propio.

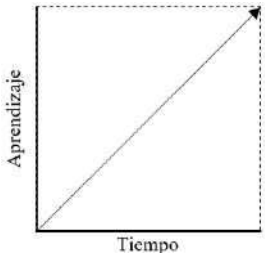


Figura 1b. Curva de aprendizaje mediado (proporcional). Fuente: Desarrollo propio.

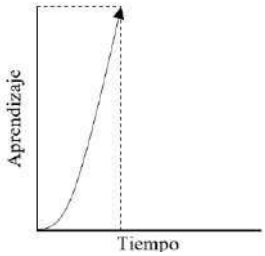


Figura 1c. Curva de aprendizaje con prototipos didácticos (exponencial). Fuente: Desarrollo propio.

Figura 1. Curvas de aprendizaje. Fuente: Desarrollo propio.

Siendo el ruido ambiental una problemática que afecta tanto al factor humano como al factor tecnológico, este puede generar defectos y fallas en el ensamble de vehículo completo en las industrias metalmecánicas. Este fenómeno aun no es atendido desde la academia, debido a que, por el alto costo y rápida obsolescencia de los dispositivos comerciales, en las IES no se cuenta con dispositivos didácticos que permitan la medición de las señales, su acondicionamiento, su análisis y presentación de resultados.

Justificando el desarrollo de prototipos funcionales que permitan emular las operaciones de un analista de vibraciones, formando profesionistas que comprenden los procesos de adquisición, análisis e interpretación de datos a favor de la continuidad del servicio de los procesos productivos y minimizar las afectaciones y fallas por resonancia o perdida de rigidez por efecto de cargas armónicas que se presentan en los elementos estructurales esbeltos.

El propósito de este documento es compartir la experiencia de una propuesta aplicada que desarrolla dispositivos mecatrónicos de tipo multidisciplinario, que tiene como objetivo principal la medición, el análisis y la generación de informes sobre el comportamiento de elementos estructurales esbeltos que componen la disposición de un chasis, armazón, armadura o estructura, tanto en el sector industrial como en productos destinados a usuarios finales.

Desarrollar un prototipo funcional requiere seguir las recomendaciones del método científico, que se basa en una serie de etapas que incluyen la observación, la formulación de preguntas, la generación de hipótesis, la experimentación, el análisis de los resultados y la obtención de conclusiones. Este enfoque se alinea con los principios de la heurística, que es una disciplina científica que busca encontrar soluciones prácticas y efectivas a través de la exploración y el aprendizaje.

Durante el proceso de desarrollo, es fundamental contar con el conocimiento adecuado de los fenómenos y características asociados a las vibraciones mecánicas. Siendo esencial comprender tanto a nivel conceptual como analítico los diferentes aspectos que explican estas vibraciones en cuanto al

comportamiento estructural. Pudiendo clasificar las vibraciones como: libres o armónicas, tanto con amortiguamiento y sin amortiguamiento, que son las de interés en este trabajo.

Los datos utilizados principalmente a lo largo de la verificación de las ecuaciones de los diferentes tipos de movimiento son: masa (m), aceleracion $(\ddot{x})$, constante de rigidez o resorte (k), desplazamiento (x), tiempo (t), velocidad $(\dot{x})$, constante de amortiguamiento (c), amplitud (A), frecuencia natural (ω_n) y fuerza (F).

El análisis estructural se fundamenta principalmente en la segunda Ley de Newton, la cual establece que el producto de la masa de un cuerpo por su aceleración es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza que actúa sobre dicho cuerpo y se expresa de la forma $F = m * a$, esta misma formula ya aplicada al contexto de las oscilaciones con y sin amortiguamiento puede observarse de la siguiente manera $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F$ o similar pero con algunas configuraciones especificas dependiendo del tipo de vibraciones a analizar. Con apoyo de Rao (2012) se realizaron las definiciones de los tipos de vibración que se presentan en diversas condiciones de: espacio, tiempo, infraestructura y de distintos instrumentos de los sistemas productivos o de interacción humana.

1.1. Vibración libre sin amortiguamiento (VLSA)

Es un tipo de vibración en el cual un sistema vibratorio oscila después de ser perturbado inicialmente, sin la presencia de fuerzas externas o amortiguamiento. No hay disipación de energía en el sistema y las oscilaciones se mantienen con amplitud constante. La ec. 1, define el movimiento o la VLSA que se obtiene por la definición de movimiento basado en la segunda ley de Newton (ec. 2).

$$m\ddot{x} + kx = 0 \tag{1}$$

$$\vec{F}(t) = \frac{d}{dt}\left(m\frac{d\vec{x}(t)}{dt}\right) \tag{2}$$

Donde:

$m =$ masa, Kg
$\ddot{x} =$ aceleración, $\frac{m}{s^2}$
$k =$ constante de rigidez o resorte, $\frac{N}{m}$
$x =$ desplazamiento o respuesta dinámica, m
t = tiempo, s

Para resolver la ecuación 1 que es la representación general de la VLSA, se ha utilizado la propuesta del método y la suma vectorial de funciones armónicas determinando la ec. 3:

$$x(t) = A * \sin(\omega_n t + \phi) \tag{3}$$

Donde:
$A =$ Amplitud, m
ω_n = frecuencia natural, $\frac{rad}{s}$
t = tiempo, s
ϕ = Angulo de fase, generalmente se considera 0 y se expresa en rad

Además, existen otras alternativas para determinar la ecuación de movimiento, como: el principio de D'Alembert (ec. 4), el principio de los desplazamientos virtuales (ec. 5) y el principio de conservación de la energía (ec. 6).

$$\vec{F}(t) - m\ddot{\vec{x}} = 0 \tag{4}$$

$$-m\ddot{x}\delta x - kx\delta x = 0 \tag{5}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}kx^2\right) = 0 \tag{6}$$

1.2. Vibración libre con amortiguamiento (VLCA)

Se trata de un fenómeno en el cual un sistema mecánico, tras sufrir una perturbación inicial, experimenta vibraciones u oscilaciones. Este sistema vibratorio está sujeto a un amortiguamiento, el cual disipa energía del sistema, lo que resulta en una disminución de las oscilaciones a lo largo del tiempo. La ec. 7, define el movimiento o la VLCA que resulta al añadir la fuerza de amortiguamiento (ec. 8) por la aplicación de la segunda ley de Newton a la VLSA (ec. 2).

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \tag{7}$$

$$F = -c\dot{x} \tag{8}$$

Donde:

F = fuerza de amortiguamiento, N
c = constante de amortiguamiento, $N\frac{s}{m}$
m = masa, Kg
x = desplazamiento o respuesta dinámica, m
$\dot{x}$ = velocidad, $\frac{m}{s}$
$\ddot{x}$ = aceleración, $\frac{m}{s^2}$
k = constante de rigidez o resorte, $\frac{N}{m}$

La ec. 9, supone una solución basada en la ecuación 10. Esto nos permite aplicar la transformada de Laplace a la ecuación 7 y hacer uso de la formula general para ecuaciones de segundo grado, obteniendo en conjunto la ecuación general (ec. 9) para sistemas VLCA.

$$x(t) = C_1 e^{\left\{-\frac{c}{2m} + \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}\right\}t} + C_2 e^{\left\{-\frac{c}{2m} - \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}\right\}t} \tag{9}$$

$$x(t) = Ce^{st} \tag{10}$$

Donde:

$C_{1,2}$= constantes dependientes de las condiciones iniciales
c = constante de amortiguamiento, $N\frac{s}{m}$
s = constante indeterminada
m = masa, Kg
k = rigidez, $\frac{N}{m}$
t = tiempo, s

Teniendo en cuenta la constante de amortiguamiento critico (ec. 11) y la relación de amortiguamiento (ec. 12), se puede simplificar más la ecuación general (ec. 10). La ecuación resultante (ec. 13) queda en función de la frecuencia natural y la relación de amortiguamiento.

$$c_c = 2m\sqrt{\frac{k}{m}} = 2m\omega_n \tag{11}$$

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \tag{12}$$

$$x(t) = C_1 e^{\left\{-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}\right\}\omega_n t} + C_2 e^{\left\{-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}\right\}\omega_n t} \tag{13}$$

Donde:

c_c = constante de amortiguamiento critico
ω_n= frecuencia natural, $\frac{rad}{s}$
ζ = relacion de amortiguamiento
t = tiempo, s

1.3. Vibración forzada armónica con amortiguamiento (VFACA)

Es la vibración de un sistema vibratorio bajo la influencia de una fuerza externa armónica, en la cual el sistema responde a una fuerza periódica con la misma frecuencia que la fuerza aplicada, el sistema vibratorio también está sujeto a un amortiguamiento. El amortiguamiento causa una disminución de la amplitud de las oscilaciones en respuesta a la fuerza externa armónica. En la ec. 15 se puede definir a la VFACA al considerar la función forzada (ec. 14) y añadiendo el factor de amortiguamiento a la ecuación de movimiento (ec. 15), siendo este el punto de partida para los sistemas VFACA.

$$F_0 \cos \omega t \tag{14}$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos \omega t \tag{15}$$

Donde:
F_0 = Amplitud de excitación, m
ω = frecuencia de excitación, Hz
t = tiempo, s
c = constante de amortiguamiento, $N\frac{s}{m}$
$m =$ masa, Kg
$k =$ constante de rigidez o resorte, $\frac{N}{m}$
$x =$ desplazamiento o respuesta dinámica, m
$\dot{x}$ = velocidad, $\frac{m}{s}$
$\ddot{x} =$ aceleración, $\frac{m}{s^2}$

Pasa solucionar la ec. 18, al ser una ecuación no homogénea, es necesario hacer uso y sumar la solución homogénea (ec. 16), y de la solución particular (ec. 17) la cual representa la vibración de estado estable, para poder obtener la solución general (ec. 18) que se complementa con la ec. 19, la cual se calcula por medio de fórmulas generales de ecuaciones diferenciales no homogéneas.

$$x_h(t) = Xe^{-\zeta\omega_n t}\cos\left(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t - \phi\right) \tag{16}$$

$$x_p(t) = \cos(\omega t - \phi) \tag{17}$$

$$x(t) = X_0 e^{-\zeta\omega_n t}\cos(\omega_d t - \phi_0) + X\cos(\omega t - \phi) \tag{18}$$

$$\omega_d = \sqrt{1-\zeta^2}\omega_n \tag{19}$$

Donde:
X = amplitud, m
X_0 = variable indeterminada
ϕ = ángulo de la fase, rad
ω = frecuencia de excitación, Hz
ω_n = Frecuencia natural, $\frac{rad}{s}$
ω_d = frecuencia natural amortiguada, $\frac{rad}{s}$
ζ = relacion de amortiguamiento
t = tiempo, s

x_p = solución particular
x_h = solución homogénea

El resultado es la validación de la propuesta de un prototipo funcional (figura 4) que se emplea como un modelo didáctico instruccional que determina las vibraciones que se pueden mostrar en una columna, representando las diversas condiciones con distintas situaciones de vibración que se encuentran presentes de manera común y con frecuencia con alto riesgo de falla. La validación se realiza mediante una gráfica comparativa de las vibraciones entre los métodos analíticos y la determinación experimental. El efecto esperado es la validación de la propuesta de un prototipo funcional que sirve como un modelo educativo instruccional para identificar las vibraciones presentes en una columna bajo diversas condiciones. Este modelo aborda situaciones comunes en las que las vibraciones representan un alto riesgo de falla. Para validar el prototipo, se ha realizado una comparación gráfica entre los resultados obtenidos mediante métodos analíticos y aquellos obtenidos experimentalmente, de esta manera, se ha comprobado la efectividad del modelo en la determinación de las vibraciones.

2. Método

El enfoque empleado es de naturaleza cuantitativa, puesto que se realiza un estudio analítico utilizando el método científico. La enseñanza conceptual (figura 2) se basa en las categorías: son las habilidades cognitivas entendidas como: aquellas facultades que posibilitan a una persona adquirir conocimiento, reflexionar sobre él, retenerlo, organizarlo y manipularlo para crear nuevas ideas y llevar a cabo diversas tareas, como establecer conexiones, formular conceptos generales, tomar decisiones, solucionar problemas y obtener aprendizajes duraderos y con sentido. Las subcategorías de análisis son: recordar, entender, aplicar, analizar, sintetizar y evaluar a partir de la taxonomía de Bloom revisada [2].

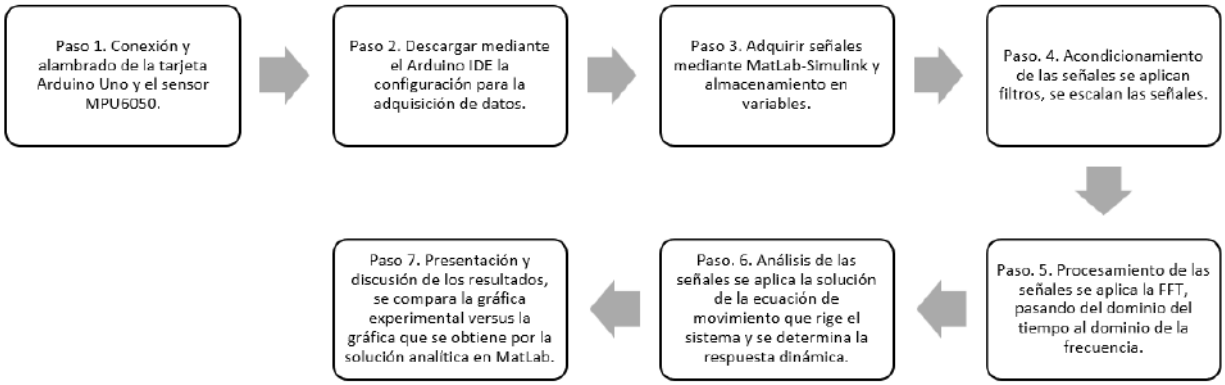


Figura 2. Enseñanza conceptual. Fuente: Desarrollo propio.

El proceso se desarrolla de manera secuencial, siguiendo un procedimiento experimental (figura 3). Para recopilar y analizar los datos, se utilizan herramientas especializadas de software que permiten la adquisición, tratamiento y procesamiento de la información. Finalmente, los resultados se presentan en forma de gráficas que muestran la evolución tanto en función del tiempo como en función de la frecuencia.

2.1 Modelo de estudio

El diseño del modelo de estudio se desarrolló mediante tecnología CAD/CAM/CAE, fabricada por impresión 3D y se configuro de manera flexible, adaptativa e integrada, por ello tiene la capacidad funcional, tanto para instrumentarse como viga o columna (figura 4 y 5). Entre las cualidades del modelo

de estudio mediciones se encuentra que es configurable a varios modelos tipo: viga o columna. En nuestro caso la configuración utilizada es tipo columna. Las figuras 4 y 5 muestran el modelo de estudio en escala real.

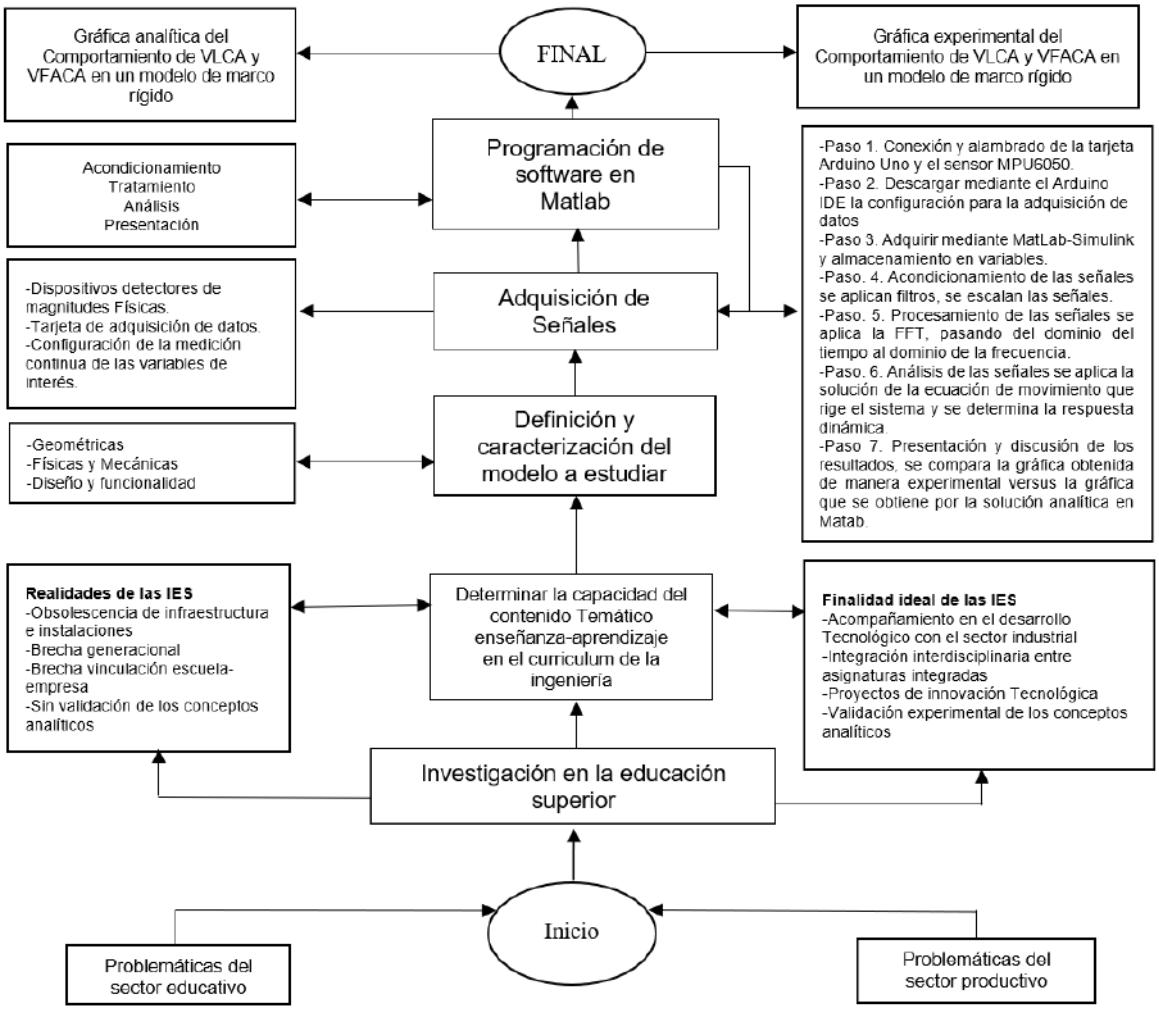


Figura 3. Diagrama de fabricación. Fuente: Desarrollo propio.

Figura 4. Configuración de modelo de estudio VLCA. Fuente: Desarrollo propio.

Figura 5. Configuración de modelo de estudio VFACA. Fuente: Desarrollo propio.

Las mediciones se realizan a través del acelerómetro y giroscopio MPU6050 unidad de medición inercial o *IMU (Inertial Measurment Units)* de 6 grados de libertad (figura 6), pues combina un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes [3].

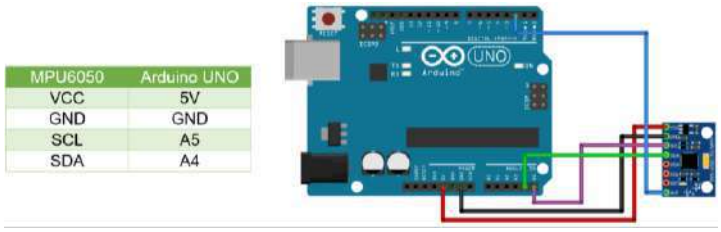


Figura 6. Conexión IMU-Arduino. Fuente: Tomada de [4].

3. Desarrollo

Para la operación en la adquisición, acondicionamiento, análisis y presentación de datos, se utilizan los Scripts que se encuentran alojados en la carpeta electrónica con la siguiente dirección: https://drive.google.com/drive/folders/1kdb4g-bDh2c_quUtFDbOTZLArnAbjNKC?usp=sharing.

Configurar correctamente la tarjeta Arduino Uno, requiere llevar a cabo dos pasos importantes. El primero de ellos consiste en ejecutar el programa denominado MPU6050_calibration.ino, cuyo propósito es calibrar los tres ejes (x, y, z) del sensor MPU6050.

Una vez completada esta etapa de calibración, se procede a ejecutar el segundo programa denominado MUESTREAR.ino. Este programa nos permite observar el comportamiento del sensor en cada uno de los ejes, utilizando el *Monitor Ploter* de Arduino. Además, este proceso nos brinda la posibilidad de visualizar los resultados en Simulink de manera clara y precisa. En el código del archivo MUESTREAR.ino se cuenta con un código corto. En el primer bloque del código se crea una instancia del objeto "accelerometer" de la clase "MPU6050" para acceder a las funciones y datos relacionados con el sensor.

En el Script VLCA_F.m, se encuentra escrita la fórmula para obtener la VLSA con base a los datos previamente escritos en el archivo Datos.mlx.

VFASA_F.m, ejecuta la fórmula para obtener la VLSA con base a los datos previamente escritos en el archivo Datos.mlx.

FFT.m, es el script para la transformada rápida de Fourier que ayuda a cambiar los datos en valor de tiempo a frecuencia.

También se encuentra el diagrama de bloques de Simulink (figura 7) para la adquisición y visualización de datos obtenidos por medio del sensor, el programa consta de tres graficas distintas para cada eje (x,y,z). Dicho programa consta de un *I2C Read* para la lectura de los datos obtenidos mediante Arduino, después se encuentra un bloque que nos realiza una operación de productos para la conversión del valor obtenido en función de la gravedad, posteriormente pasa a *Demux* el cual extrae la señal del vector de entrada y emite señales separadas, las cuales están ordenados de arriba hacia abajo en el orden x, y y z que corresponden a cada uno de los ejes; donde luego va hacia un filtro pasabajas con valor de referencia 3 en el cual se tienen dos salidas, una hacia el bloque *To Workspace* que nos manda los valores al *workspace* de Matlab, y la otra hacia el *scope* donde permiten visualizar rápidamente los datos de la simulación a lo largo del tiempo.

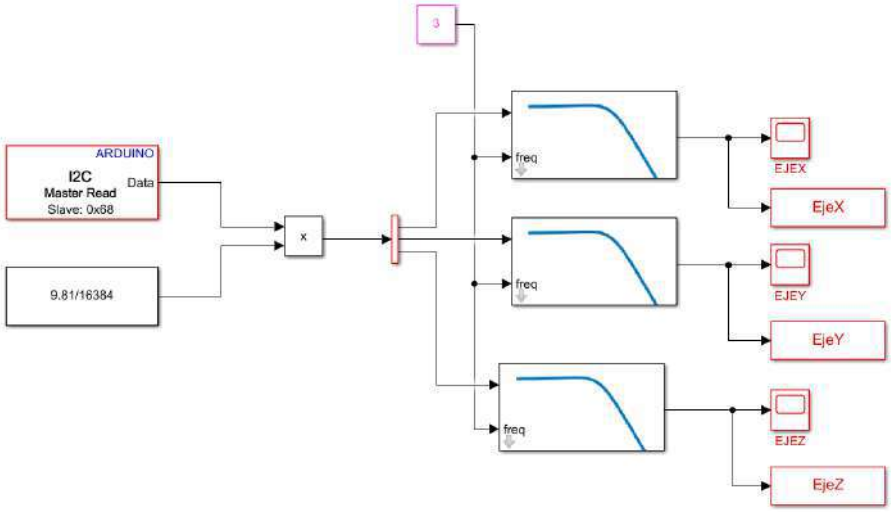


Figura 7. Diagrama de bloques Simulink. Fuente: Desarrollo propio.

4. Resultados

El mantenimiento de los modelos prácticos mediante prototipos funcionales y la posibilidad de evaluar los logros desde la institución educativa constituye una táctica sumamente eficaz. Esta táctica fomenta el progreso y la creatividad en los aparatos empleados en el proceso de enseñanza, generando una diversidad de saberes y vivencias que enriquecen los distintos entornos educativos. Los conceptos relacionados con vibraciones son fundamentales en la disciplina de vibraciones mecánicas. Estos conocimientos desempeñan un papel crucial en el plan de estudios de la licenciatura en ingeniería en las Instituciones de Educación Superior (IES), ya que permiten adquirir una comprensión profunda del comportamiento de los elementos estructurales frente a diversas formas de vibración.

Durante el análisis de las gráficas experimentales de vibraciones con y sin amortiguamiento, se observa que existe una gran similitud con las gráficas de la solución exacta, avanzando de la compresión analítica conceptual a la aplicación práctica (figuras 8 y 9) en cuanto a las propiedades dinámicas de la estructura: Periodo y Frecuencia.

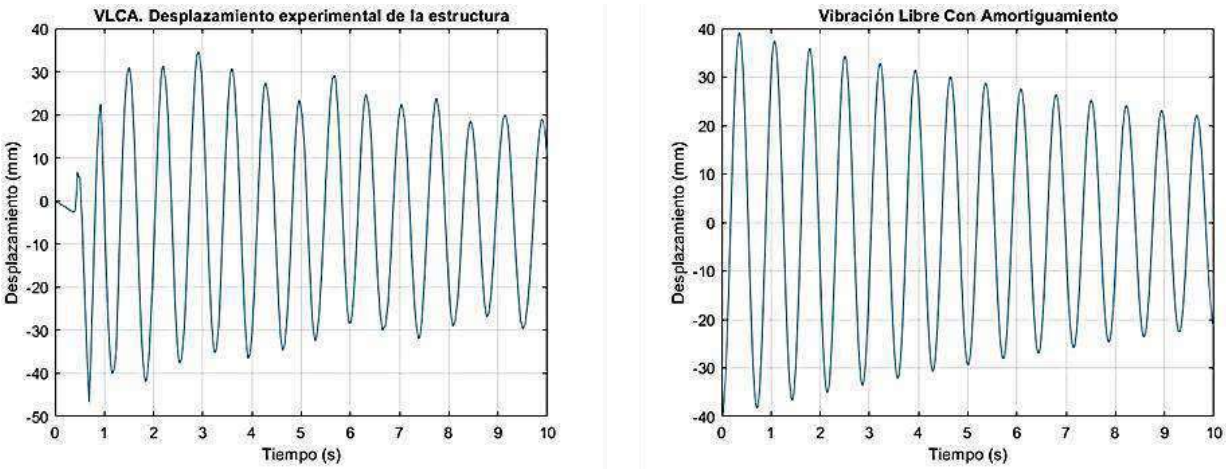


Figura 8. Comparativa de gráficas de VLCA. Fuente: Desarrollo propio.

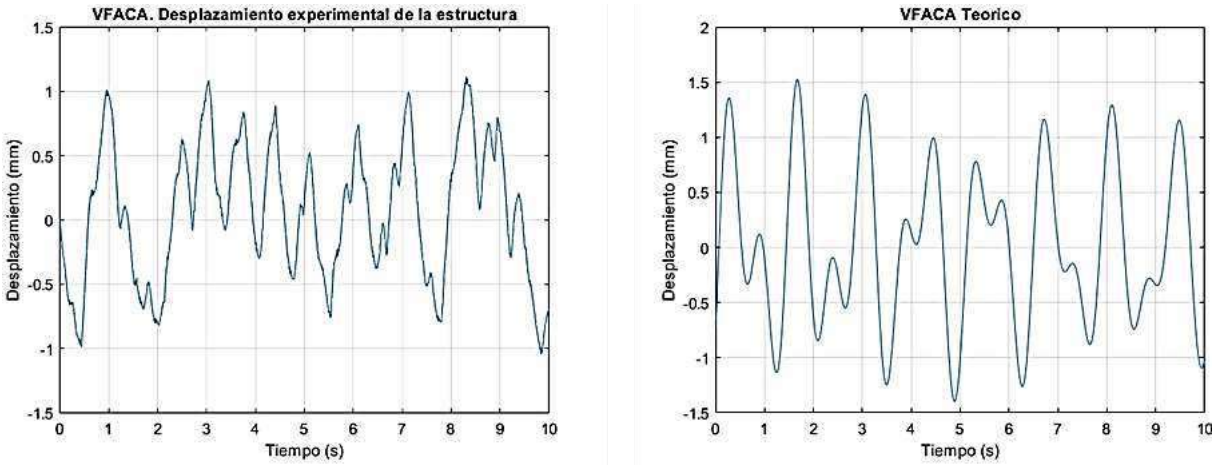


Figura 9. Comparativa de gráficas de VFACA. Fuente: Desarrollo propio.

Las figuras 10, 11 y 12, representan la vibración obtenida de manera experimental con respecto al tipo VFACA, que presenta amplios aportes de ruido ambiental, no siendo funcional el filtro empleado para adquirir las señales de aceleración. Requiriendo un trabajo de continuación de un *Script*, que permita un filtrado más limpio de la señal y verificar con mayor precisión los valores de periodo y frecuencia.

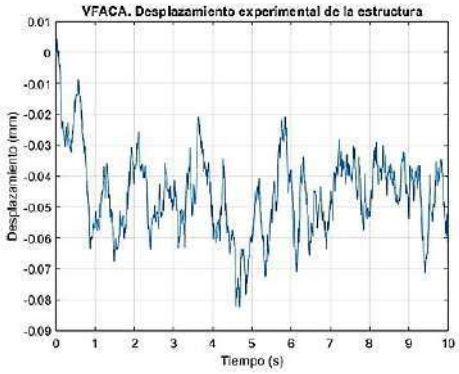


Figura 10: Experimental VFACA, motor apagado. Fuente: Desarrollo propio.

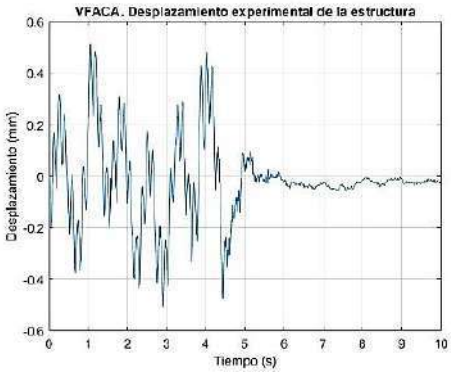


Figura 11: Experimental VFACA. Motor 5s encendido y 5s apagado. Fuente: Desarrollo propio.

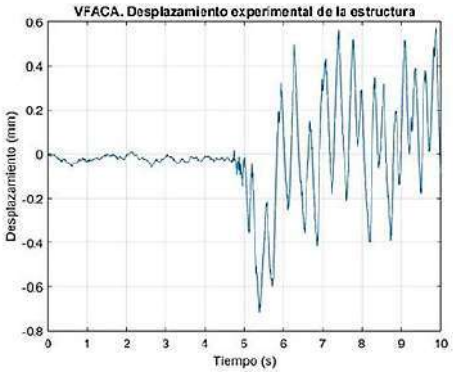


Figura 12: Experimental VFACA. Motor 5s apagado y 5s encendido. Fuente: Desarrollo propio.

La tabla 1, presenta la síntesis de los valores de las vibraciones que se comparan entre los resultados analíticos y experimentales. En esta comparación es posible observar tanto la Vibración Libre con Amortiguamiento (VLCA), así como la Vibración Forzada Armónica con Amortiguamiento (VFACA) para un mejor entendimiento. Asimismo, en la tabla 1 se recopilan los comentarios de los estudiantes que participaron en el desarrollo del proyecto, que expresan la apropiación de la tecnología aplicada y su reproducción a favor del estudio del ruido ambiental y sus efectos en el procedo de ensamble de vehículo completo en las empresas metalmecánicas.

Tabla 1. Comparativa cuantitativa analítica-experimental. Fuente. Desarrollo propio.

Tipo de vibración	Gráficas analíticas	Gráficas experimentales	Observaciones
VLCA	Se observa una señal en forma de onda que atenúa su oscilación a través del tiempo	Se observa una atenuación con ligeras variaciones en comparación a la analítica debido a condiciones ambientales	*"Nos parecieron interesantes los proyectos a investigar pese a que no estábamos familiarizados de esta forma con los temas en cuestión"* *"Fue complicado al principio ya que estábamos buscando las definiciones de una manera distinta a la requerida ya que no teníamos conocimiento previo relacionado a la escritura de artículos"*
VFACA	Se observa una señal en forma de onda que comienza en valor alto y posteriormente se atenúa y estabiliza en un rango de oscilación	El comportamiento experimental es muy similar al comportamiento analítico	*Posterior a la corrección y explicación del método correcto para la escritura de los conceptos, se hicieron los cambios sugeridos, lo cual también nos costó un poco explicar de manera puntual lo requerido"* *"Fue de gran utilidad las observaciones para mejorar nuestro trabajo, así como fue interesante la explicación didáctica para el entendimiento de los conceptos"*

El presente estudio de investigación aplicada se centra en la transferencia de tecnología y busca proporcionar una experiencia integral que puede ser reproducida exitosamente, ya sea a través de un enfoque educativo guiado por un docente o de manera autodidacta sin requerir asistencia externa.

Al representar el prototipo funcional una oportunidad formativa complementaria al curriculum de las licenciaturas en ingeniería, su contribución innovadora radica en la capacidad para detonar y potencializar las habilidades cognitivas [2] del ejecutor (alumno o docente), al reproducir la experiencia, la modificación de las capacidades cognitivas se menciona a continuación:

- Identifica y manipula (arma, mide y ajusta) los modelos físicos para comprender los términos y conceptos, tanto concretos como abstractos.
- Analiza las distintas vibraciones y su relación con los cambios en la forma y las propiedades físicas y mecánicas, los cuales pueden afectar la funcionalidad de los elementos estructurales.
- Almacena en la memoria las condiciones de estabilidad e inestabilidad, tanto seguras como inseguras, de los elementos estructurales esbeltos.
- Relaciona el comportamiento de los elementos estructurales esbeltos con la gráfica esfuerzo-deformación del material, ya sea lineal o no lineal.
- Replica de forma precisa la instrumentación de elementos estructurales esbeltos a una escala adecuada. Mejora, las configuraciones y características de los modelos estructurales ante vibraciones amortiguadas y sin amortiguamiento
- Proporciona un resumen de los comportamientos observados y los vincula utilizando coeficientes o factores experimentales para simplificar el diseño sin comprometer la seguridad o la eficiencia.
- Examina la precisión y la exactitud de los modelos analíticos en comparación con los modelos experimentales.
- Introduce nuevas configuraciones estructurales que ofrecen una óptima relación entre esfuerzo y deformación, manteniendo altos niveles de seguridad sin exceder los costos económicos.

5. Conclusiones

Durante la participación en el programa de investigación práctica XXVIII Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico 2023, se logró desarrollar y poner en funcionamiento un modelo experimental capaz de evaluar y registrar el comportamiento de los elementos estructurales en términos de vibración. Este dispositivo fue diseñado para ser aplicado en diversos ámbitos, como la construcción civil y la industria metalmecánica, y permite realizar mediciones, análisis y reportes precisos sobre la integridad de chasis, armazones, armaduras y otras estructuras similares.

Este modelo experimental busca ser aplicado en la instrucción de las materias fundamentales en el plan de estudios de la licenciatura en ingeniería. Estas asignaturas abarcan un extenso contenido analítico, tanto en los principios que describen los fenómenos físicos, como en las conexiones que brindan soluciones a diferentes tipos de situaciones o escenarios que involucran condiciones operativas regulares o de emergencia, sin importar si poco significativas o catastróficas. Adquirir una comprensión clara de la relación entre las condiciones operativas de una estructura y las consecuencias que se producen al exceder sus propiedades geométricas, físicas o mecánicas, es un aspecto crucial en el ámbito de la ingeniería. Este conocimiento y experiencia son altamente valiosos, ya que fortalecen la formación del ingeniero y les otorgan la capacidad de analizar y predecir el comportamiento de elementos estructurales esbeltos frente a vibraciones mecánicas.

Se puede concluir que, mediante la participación en programas dedicados a la investigación científica y tecnológica, como el XXVIII Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico 2023, es posible desarrollar una mentalidad y una pasión por la investigación. Que permite disponer de dispositivos que son capaces de medir, analizar y comunicar el comportamiento de los elementos estructurales que constituyen la disposición de un chasis, armazón, armadura o estructura cuando están sujetos a vibraciones. Estos dispositivos pueden ser utilizados tanto en la construcción civil como en la industria metalmecánica, en aplicaciones estáticas o móviles. Además, este enfoque fomenta la educación heurística de manera individual y también contribuye a la promoción de la investigación en la comunidad académica.

Referencias

[1] Secretaría de Gobernación, «Diario Oficial de la Federación,» 18 11 2022. [En línea]. Available: https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPEUM.pdf. [Último acceso: 24 11 2022].
[2] M. Frías, Y. Haro y I. Artiles, «Las habilidades cognitivas en el profesional de la Información desde la perspectiva de proyectos y asociaciones internacionales,» Investigación Bibliotecológica, vol. 31, nº 71, pp. 201-218, 2017.
[3] Naylamp Mechatronics SAC, «TUTORIAL MPU6050, ACELERÓMETRO Y GIROSCOPIO,» s.f.. [En línea]. Available: https://naylampmechatronics.com/blog/45_tutorial-mpu6050-acelerometro-y-giroscopio.html.
[4] PROMETEC, «USANDO EL MPU6050,» s.f.. [En línea]. Available: https://www.prometec.net/usando-el-mpu6050/.
[5] S. Benavent-Nácher, P. Rosado, F. Romero y J. Abellán-Nebot, «SYSML4TA: A SysML Profile for Consistent Tolerance Analysis in a Manufacturing System Case Application,» Appl. Sci., vol. 13, nº 3794, pp. 1-29, 2023.
[6] D. Esposito, J. Centracchio, E. Andreozzi, P. Bifulco y G. Gargiulo, «Design and Evaluation of a Low-Cost Electromechanical System to Test Dynamic Performance of Force Sensors at Low Frequencies,» Machines, vol. 10, nº 1017, pp. 1-19, 2022.
[7] V. Gursky, P. Krot, V. Korendiy y R. Zimroz, «Dynamic Analysis of an Enhanced Multi-Frequency Inertial Exciter for Industrial Vibrating Machines,» Machines, vol. 10, nº 130, pp. 1-17, 2022.
[8] X. Lu, R. Yang, W. Qian y S. Sun, «Design and Manufacture of Similar Model of Folding Wings and Study on Dynamic Characteristics,» Machines, vol. 10, nº 1149, pp. 1-13, 2022.
[9] S. Rao, Vibraciones mecánicas, PEARSON, 2012.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 3, pp. 26 – 38
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Diseño, selección y estandarización del funcionamiento de los componentes para un prototipo de estación meteorológica automática utilizando una Raspberry Pi 4 y la tecnología IoT en Valle de Bravo, Estado de México.

Rodríguez González José Miguel [1✉], Morán Hernández Juan[2], Vargas Oseguera Liliana Lucero [1] y Terán Soria Arath[1]
[1]Tecnológico Nacional de México / TES de Valle de Bravo
[2]Universidad de la Salud, CDMX
✉jose.rg@vbravo.tecnm.mx

Resumen

El monitoreo meteorológico en tiempo real, así como el almacenamiento de los datos históricos del clima, ayudan en la planeación de las actividades diarias de los seres humanos en sus respectivas áreas de desarrollo. Particularmente en México, existe una gran diversidad de climas. Al ser Valle de Bravo, Edo. de México nuestra área de estudio, medir las condiciones meteorológicas del clima en la región contribuye significativamente a la mejora en la autonomía para el control, monitoreo y regulación de sus operaciones generadoras de recursos económicos y la prevención de eventos indeseables consecuencia de las condiciones climatológicas en la región. Cabe mencionar que Valle de Bravo es un destino de carácter turístico, donde se realizan diversas actividades al aire libre que por ende dependen de las condiciones del clima para su desarrollo económico y social. En esta ciudad no se cuentan con estaciones meteorológicas activas desde el año 2018, por lo que existen datos históricos gubernamentales desactualizados y el conocimiento de los datos meteorológicas son recabados de fuentes externas a la localidad y las fuentes internas no tienen un registro oficial ante al órgano especializado (CONAGUA). El presente trabajo muestra el desarrollo y diseño de un prototipo de estación meteorológica automática con la ayuda del Internet de las cosas (IoT), que es estandarizada en sus componentes (Anemómetro y pluviómetro) en la localidad de Valle de Bravo, asimismo se muestran datos obtenidos mediante gráficos.

Palabras clave: Estación meteorológica automática, Automatización, IoT, clima, cambio climático, control.

1. Introducción

Una estación meteorológica automática (EMA) es un sistema que integra sensores para medir diversos parámetros meteorológicos que además se puede acceder a ella mediante el uso de red en lugares remotos [1]. Las variables meteorológicas han estado presentes en nuestra vida diaria como un fenómeno natural que, gracias a las invenciones del ser humano, se han podido monitorear con una EMA [2]. La temperatura, la presión atmosférica, la velocidad del viento, la humedad relativa, entre otras, son variables que se miden a través de los instrumentos meteorológicos y estos en conjunto, constituyen a una estación meteorológica, las cuales pueden ser implementadas en diversas áreas como la agricultura, navegación, construcción, deportes o recreación [3].

El clima es el conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan a una región geográfica, es un factor primordial para el ser humano y las variaciones en éste inciden sobre las actividades productivas de las poblaciones humanas. Cuando se presentan irrupciones de fenómenos

meteorológicos extremos, se pone en peligro la seguridad de toda la población. La prevención de climas extremos es una de las razones principales por las que las EMA's existen [4].

En el contexto nacional se realiza un monitoreo en tiempo real por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), para el uso de datos en el pronóstico del clima y la prevención de desastres naturales, esto porque México es un país, que debido a su diversidad geográfica tiene a su vez una gran variedad de condiciones atmosféricas que afectan el desarrollo de las actividades productivas y el bienestar de la población, considerando a su vez las afectaciones del cambio climático [5]. En un contexto regional y local, alrededor del Estado de México, existen diversas estaciones meteorológicas que son reguladas por CONAGUA, se cuentan con un total de 195 en operación y tan solo en el municipio de Valle de Bravo se cuentan con 4 estaciones que desde el año 2108, no reportan las condiciones meteorológicas, 3 de ellas en operación con un periodo de 2013-2018, por lo que en la actualidad contamos con datos desactualizados para la región [6]. La importancia de este proyecto recae en que el municipio en cuestión tiene como característica principal, ser un atractivo turístico durante todo el año, en el cual es primordial el tipo de clima para realizar diversas actividades [7]. No existe un sistema meteorológico en Valle de Bravo que forme parte de la red nacional de estaciones meteorológicas implementadas por CONAGUA, que es la entidad nacional mexicana encargada de recabar este tipo de información climatológica que es referente para el Estado Mexicano, sin embargo, es importante señalar que el centro ecológico "El humedal" en la localidad de Santa María Ahuacatlán (19.184°100.27°, 1805m) cuenta con una estación marca Davis instruments, modelo Vantage Pro 2, que puede ser ubicada vía remota en la página https://www.wunderground.com/, que tiene trazabilidad con https://weather.com/ y a su vez con Google, tal como ellos mismos lo muestran (Ver Figura 1).

En adición, la transferencia y el procesamiento de los datos de una estación meteorológica es una característica en las EMA's que cobran importancia cuando los datos son enviados de manera rápida y precisa, es decir, en la actualidad existen instrumentos diseñados para la detección, procesamiento y transferencia de datos, que pueden emplear un enlace directo por cable, siendo el más utilizado, debido a su confiabilidad, estabilidad, capacidad y que aún supera a los enlaces inalámbricos; el *Wireless Fidelity* (Wi-Fi, por sus siglas en inglés), que nace ante la necesidad de tener accesos de banda ancha inalámbricos en recintos cerrados y posteriormente en lugares públicos por medio de los llamados *Hot Spots* o puntos de acceso libres o prepago; *Global System for Mobile Comunication* (GMS, por sus siglas en inglés), el cual funciona para la conectividad móvil, hoy en día desde cualquier dispositivo móvil se puede contar con esta tecnología, usado en un inicio para servicios de enviar y recibir mensajes por correo electrónico, negación por internet y accesos seguros a redes informáticas internas (LAN/Intranet) de empresas; enlace satelital, el cual está diseñado para lugares de difícil acceso, ya sea por el terreno o situaciones climatológicas, esto debido a su funcionamiento que depende de un dispositivo receptor y transmisor, pero que depende del sistema de satélites en funcionamiento y a su vez de la infraestructura de estos [8] [9] [10].

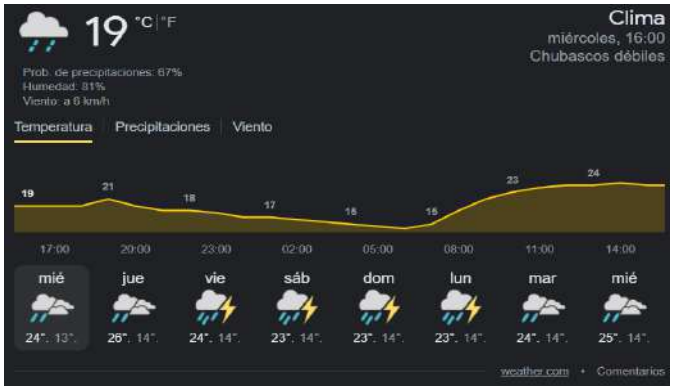


Figura 1. Sistema de referencia climatológico de Google.

Todo lo anteriormente descrito, motiva el diseño de un nuevo prototipo de estación meteorológica en el municipio de Valle de Bravo. Para el diseño y construcción, se eligió el

microcomputador Raspberry Pi 4 y debido a que su sistema operativo es desarrollado con base en Linux, se utilizó Python como lenguaje de programación para su integración en el sistema [11]. Para las variables de temperatura, humedad y presión, se eligió el sensor multiparamétrico marca DIYmall, modelo BME-280, que integra tres sensores encapsulados en uno solo, permitiendo reducir las dimensiones del prototipo diseñado. Este utiliza el protocolo I^2C para la comunicación a través de dos pines, el *Serial Clock(SCL)*, que establece la comunicación entre el microcomputador y el sensor, definiendo el tiempo de lectura del sensor y el *Serial Data(SDA)*, que envía los datos de lectura de vuelta al microcomputador [12]. Para determinar la velocidad del viento se integró al sistema un anemómetro marca Adafruit, modelo ads1x15, donde el factor diferencial de este fue la calidad del producto y el rango de medición, que va de 0.4-2V, correspondiente a 0-32.4 m/s; en conjunto con este, se utilizó un Arduino Nano como microcomputador. Para el pluviómetro se utilizó un sensor magnético, marca TECNEU, modelo A3144e, que funcionó de la misma forma que el anemómetro en cuanto a la comunicación entre sensor y microcomputador (Arduino Nano), sin embargo, la data se generó con interrupciones de pulso al cambiar de un estado de lleno a vacío.

Para alojar a los dispositivos se realizó el modelo de una carcasa principal en la cual sensor BME-280 fue instalado, lo cual aísla al sistema, protegiéndolo de corrientes de aire, de interferencia de datos por algún tipo de fauna, así como de la lluvia, así mismo el modelo servirá como base del anemómetro. Este modelo se realizó en el software SolidWorks utilizando modelado por extrusión. Para el pluviómetro se realizó el modelo de cuba basculante, utilizando ingeniería inversa por medio del pluviómetro existente y en desuso, instalado en el Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo. En cuanto a los resultados, se han obtenido datos comparativos entre la estación remota Davis, en la cual se observaron errores porcentuales relativos de 4.02% para la temperatura, 20.23% en la presión atmosférica, 11.1% de humedad relativa y de 1.93% para la cantidad de agua lluvia.

2. Metodología

2.1 Diseño propuesto de la EMA.

A. Arquitectura de la estación

La estación meteorológica está conformada por los elementos descritos en la Figura 2, A. Raspberry Pi 4, B y C. Arduino Nano para el anemómetro y pluviómetro, respectivamente, D. Sensor *BME-280,* E. Anemómetro *Adafruit_ads1x15*, F. Pluviómetro, G. Almacenamiento en la nube y H. Página web.

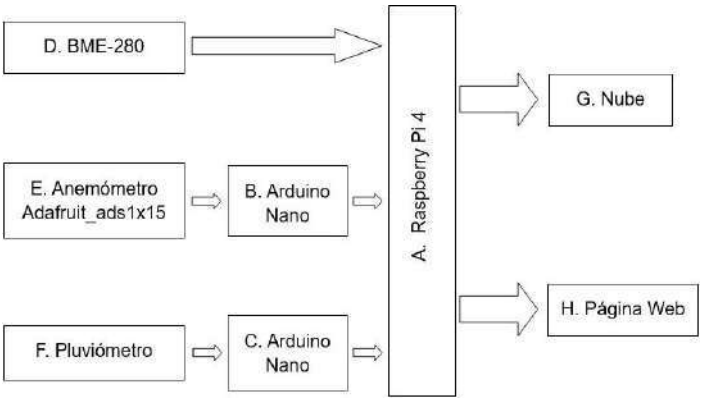


Figura 2. Diagrama de bloques de la arquitectura de la EMA.

B. Sensor BME-280.

Este dispositivo integra tres sensores encapsulados, que miden la temperatura, presión atmosférica y la humedad relativa, este dispositivo está basado en tecnología BOSH piezo-resistiva

EMC, las características generales son, voltaje de operación de 1.8V a 3.3V DC, descrito por ellos de ultra bajo consumo, alta precisión y linealidad, además de estabilidad a largo plazo, con una frecuencia máxima de muestreo de 157 Hz, se puede conectar a un microcontrolador por medio del protocolo I^2C o SPI en 3.3V. El que se utilizó, marca DIYmall tiene una arquitectura de 4 pines, 2 pines de alimentación + y GND (tierra), y los pines de comunicación, *serial data (SDA)* y *serial clock (SCL)*.

Temperatura.

El sensor encapsulado es un termoresistor, que es un tipo de resistencia que depende de la temperatura, se compone de cerámica o polímeros. El rango de medición va de -40°C a 85°C con una precisión de hasta 0.01°C y un error de hasta 1°C según las especificaciones.

Presión atmosférica.

El sensor encapsulado es un piezoeléctrico, dentro de este hay una membrana que puede microdeformar cuando existe una cierta cantidad de presión, y a su vez se traduce en una variación de resistencia. El rango de medición va de 300 a 1100hPa (0.3-1.1 bar) con una precisión de hasta 0.16Pa y un error de hasta 1hPa según las especificaciones.

Humedad relativa.

Se compone de un circuito de conversión y un condensador sensible a la humedad, compuesto de un sustrato de vidrio, electrodos y material sensible a la humedad, generalmente un polímero de alto peso molecular, este último cambia su capacitancia según la cantidad de humedad en el ambiente y esto ocasiona un cambio de voltaje registrado como un cambio de humedad relativa. Su rango de operación va de 0-100% HR, una precisión de ±3% y un rango de altura medible de 0-9100m,

Modelado 3D de carcasa.

Para la realización del modelado 3D, se utilizó una geometría que ayudará a proteger el sensor de la intemperie, lluvia y donde el sensor estuviese sujeto a la propia carcasa, dicho modelo es desarrollado en el software SolidWorks (Ver Figura 3), una vez realizado se imprimió por medio de manufactura aditiva, para este prototipo se utilizó el polímero PLA que es el más comercializado para esta tecnología (Ver Figura 4), con la intención de observar las áreas de mejora.

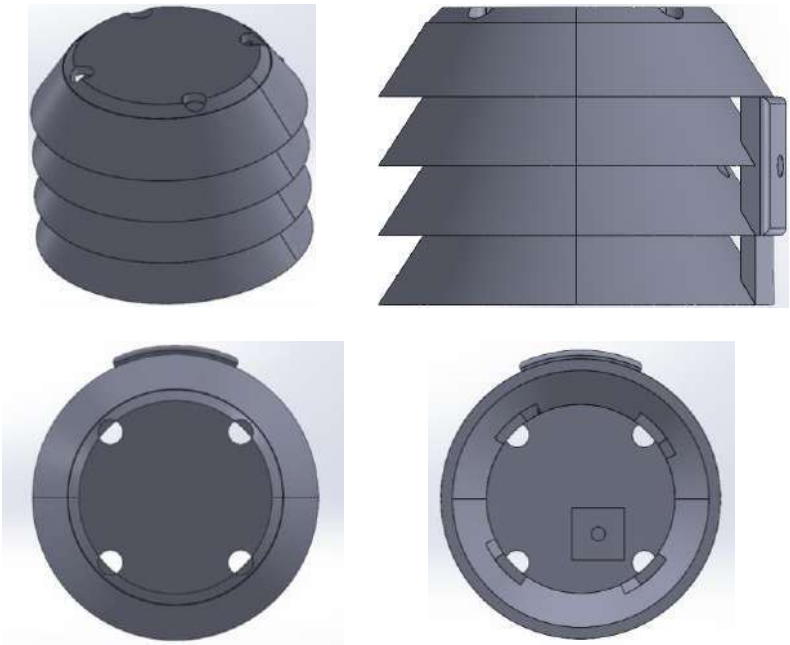


Figura 3. Modelado 3D de la carcasa para alojar el sensor BME-280.

Figura 4. Impreso 3D en manufactura aditiva PLA de la carcasa para alojar el sensor BME-280.

C. Anemómetro.

Se trata de un anemómetro de señal analógica, marca Adafruit, modelo ads1x15, con un rango de medición de 0.4V-2V, correspondiente a 0-32.4 m/s, respectivamente. Para la conexión entre este y el microcomputador se optó por utilizar un Arduino Nano que realiza la función de conversión de señal de analógica a digital para que pueda ser transportada al Raspberry Pi 4. El proveedor no específico el modelo de medición de este, por lo que se optó realizar modelación matemática con el fin de obtener el modelo que indique como se comporte la señal de acuerdo con la velocidad del viento, ya que suponer que es lineal es trivial y nada objetivo. Es por ello por lo que se realizó la validación de datos del anemómetro de la siguiente forma.

Validación de datos de lectura del anemómetro.

1. Se buscó un anemómetro calibrado para la comparación y validación del anemómetro Adafruit que estará integrado al prototipo, se contó el anemómetro marca PEAKMETER, modelo PM6252B, el cual tiene un rango de medición de 0.8~30 m/s con una precisión de ± 2% en la lectura,
2. Para la comparación del parámetro descrito de forma uniforme, se optó por utilizar un túnel de viento marca GUNT Hamburg, modelo, HM226, con caudal volumétrico máximo de 480 m^3/hr,
3. El túnel de viento varía de acuerdo con la escala mostrada en la Figura 5, la cual se comenzó a medir una a una con el anemómetro calibrado, para establecer una tabla de comparación, con ello se buscaba obtener los datos condensados en la segunda columna (m/s) de la Tabla 1.

Figura 5. Compresor de aire con entrada variable de 10 niveles del túnel de viento, marca GUNT Hamburg, modelo, HM226.

4. La medición inicial, se realizó con el anemómetro Adafruit en el mismo rango que el anterior, para buscar homogeneidad en las mediciones, con ello se establecieron los datos de voltaje de la tercera columna (V) de la Tabla 1 y se obtuvo la tendencia de datos mediante un gráfico de correlación de voltaje (Ver Figura 6).

Tabla 1. Datos de comparación para la estandarización del anemómetro Adafruit por medio del anemómetro PEAKMETER

Rango de velocidades del túnel de viento	Velocidad de viento registrada Anemómetro PEAKMETER [m/s]	Voltaje registrado, Anemómetro Adafruit [V]
1	0	0.4
2	0.32	0.412
3	0.82	0.430
4	1.13	0.445
5	1.48	0.469
6	1.95	0.493
7	2.33	0.512
8	2.75	0.531
9	3.07	0.552
10	3.21	0.558

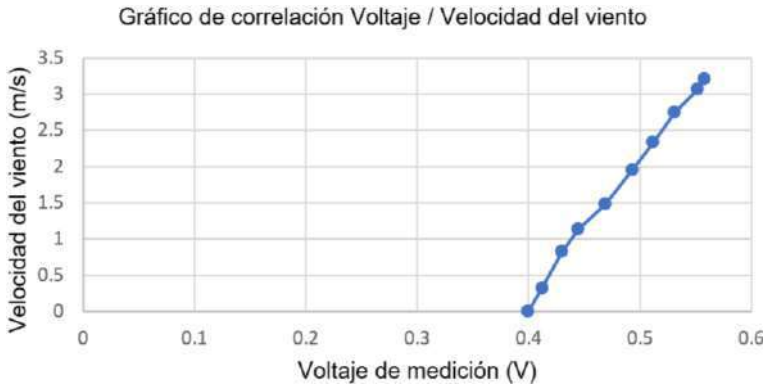


Figura 6. Gráfico de correlación voltaje (Adafruit) y velocidad del viento (PEAKMETER).

5. A partir de la Figura 6 se observa un comportamiento cuasi lineal y con rango estrecho de 0~3.21 m/s no se llega al máximo de 32.4 m/s. Con este antecedente se utilizó el método de regresión por mínimos cuadrados, con el cuál se obtuvo el modelo de comportamiento lineal para la velocidad del viento (V_v) respecto al voltaje del sensor (T), con un error estándar de la estimación ($S_{y/x}$) de 0.077 y una desviación estándar original (S_y) de 2.2029 y debido a que $S_{y/x} < S_{y/x}$ el modelo es adecuado y con un coeficiente de determinación o de Pearson cuadrado de r^2=0.9959, lo que indica que por el modelo se explicó el 99.59% de la incertidumbre original.

Modelo obtenido: $V_v = 19.6975T - 7.7527\ [m/s]$

6. El modelo obtenido fue incluido en el código del programa de adquisición de datos para que se procesen los datos una vez que se ejecute dentro de la EMA.

D. Pluviómetro.

Este elemento funciona con base en el pluviómetro tipo cuba basculante (Ver Figura 7), el cual se basa en el principio de un sube y baja, cada que se llena uno de los dos recipientes que integran la báscula interna se tiene un ciclo, que equivale a 3 ml de agua, esto se contabiliza hasta llegar a un ciclo, es decir, un total de 1000ml, equivalentes a 1 l/m^2 o 1mm/m^2. Este pluviómetro se modelo

utilizando ingeniería inversa, es decir, se contaba con una estación meteorológica en desuso dentro de las instalaciones del Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo, marca, LA CROSSE TECHNOLOGY, modelo, WS-2813U-IT que contaba con un pluviómetro, con el mecanismo descrito pero que el circuito estaba dañado.

Figura 7. Pluviómetro de cuba basculante.

Proceso de diseño a través de ingeniería inversa.

1. Se comenzó el proceso de escaneo 3D utilizando un escáner 3D marca Artec, modelo Artec Eva, se escanearon la carcasa y componentes internos del pluviómetro, realizar un post procesamiento de datos para obtener un modelo con extensión *.STL* (Ver Figura 8),
2. Se realizo la depuración del modelo por medio del software SolidWorks, además de modificar algunos elementos del pluviómetro original que se adaptarían al circuito del sensor magnético (Ver Figura 9),
3. Una vez depurado el modelo se reprodujo por medio de manufactura aditiva 3D, con un polímero ABS, utilizado para aplicaciones a intemperie y altas temperaturas, necesarias para nuestro dispositivo (Ver Figura 10), una vez impreso se integró el circuito de medición,
4. El uso de ABS es para aminorar el incremento de temperatura interior y que las mediciones sean efectivas.

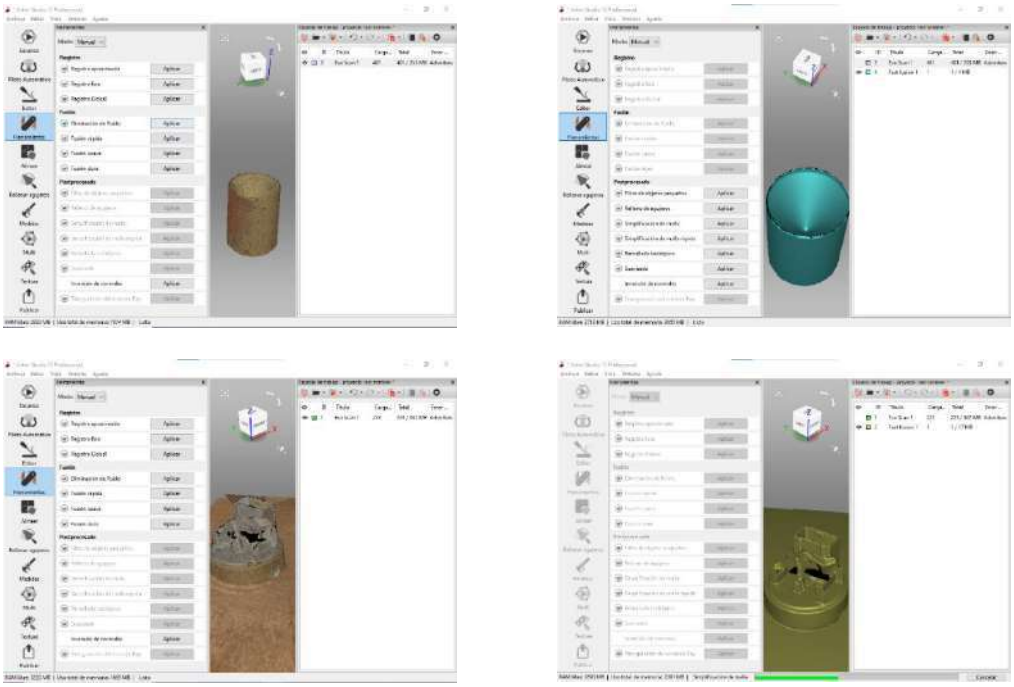


Figura 8. Post procesamiento de la información escaneada del pluviómetro utilizando el software ARTEC Studio Profesional 13.

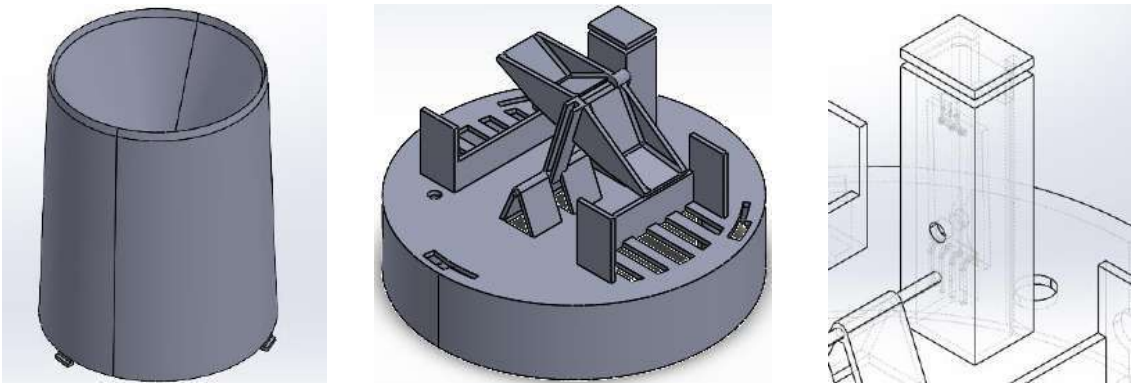


Figura 9. Modelo CAD del pluviómetro modificado.

Figura 10. Modelo impreso en manufactura aditiva.

El dispositivo de medición está integrado con un sensor magnético marca *TECNEU,* modelo *A3144e*, sensor de efecto Hall, capacitado para la detección del campo magnético si fuese lo suficientemente fuerte o bien está cerca, como puede ser el pasar un imán sobre el sensor, funciona - con un voltaje de 3,3~5V y una corriente de salida de 16mA teniendo una salida analógica y siendo compatible con la tecnología Arduino, PIC, AVR, DSP, STM32, COP, RASPBERY, entre otras. La interacción con el microcomputador funciona por medio de interrupciones de señal, cada señal equivale a los 3 ml de agua y se va guardando, obteniendo así los ml/m^2 de agua que caen en el periodo establecido de lectura de datos de 5 minutos.

E. Integración con Raspberry Pi 4

Programación-Procesamiento de datos

La integración de cada sensor con el Raspberry se realizó mediante un proceso de programación descrito en la Figura 11. El proceso ocurre en el Raspberry PI 4, que tiene como inicio tres entradas.

1. Sensor *BME-280*, se solicitan los datos del microcomputador al sensor usando el protocolo I^{2}C, este envía los datos solicitados de vuelta, creando el archivo con extensión *.csv* donde se guardaran los datos.

2. Anemómetro *Adafruit_ads1x15,* este requiere de un Arduino Nano, el cual recibe la señal analógica del anemómetro y una vez obtenida esta señal, es transformada a una digital que es recibida por el Raspberry Pi 4, con esto la velocidad del viento se va almacenando en el documento *.csv* creado anteriormente.

3. Pluviómetro integrado con sensor magnético *A3144e*, se realiza el mismo proceso descrito en 2 para el procesamiento de datos (Ver Figura 12) y son procesados para mostrarlos en

un formato previamente establecido (Ver Figura 13). Finalmente, este proceso es realizado cada 5 minutos.

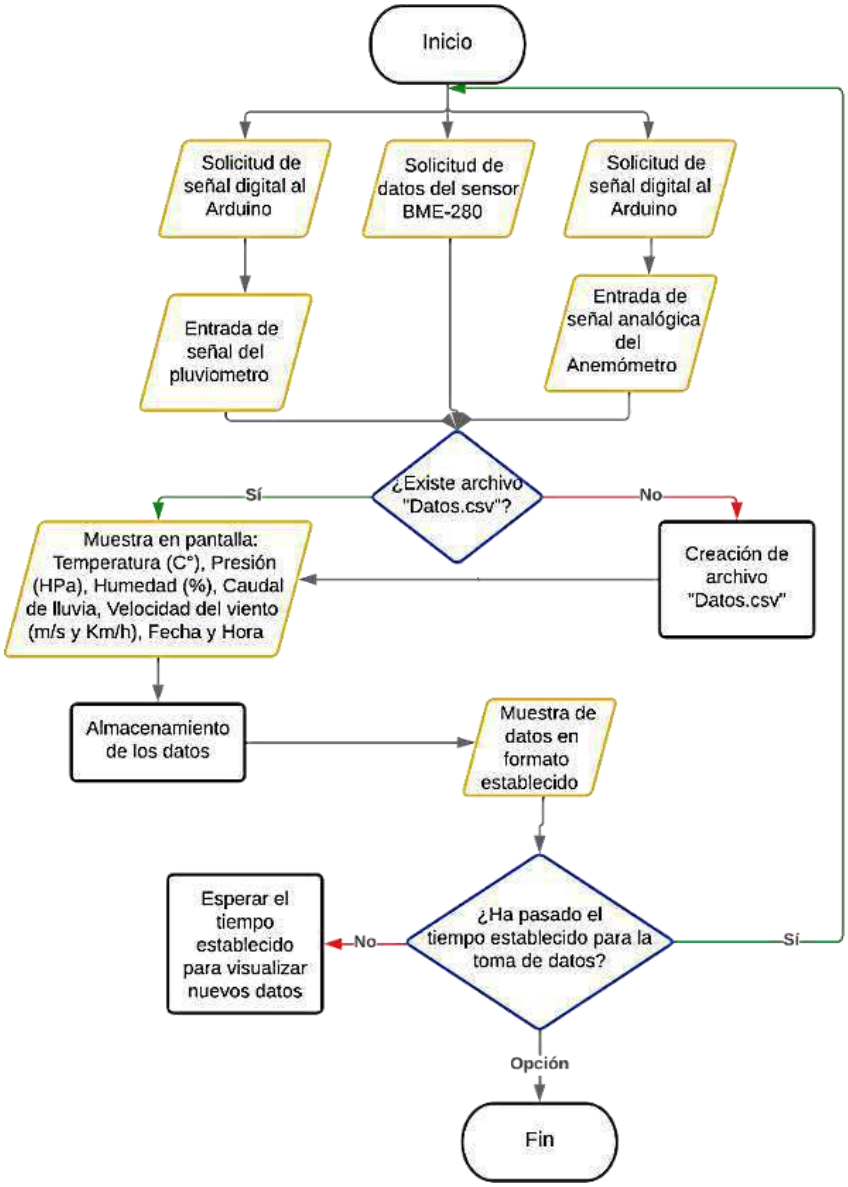


Figura 11. Algoritmo de la programación y procesamiento de datos.

Integración de conexiones.

El diagrama de conexión general se muestra en el Figura 14, para implementar el hardware de la estación meteorológica con un sensor de temperatura, presión y humedad (BME-280) hay que realizar la conexión de los pines correspondientes los cuales son los siguientes: 1) Terminal de alimentación positivo (5.0 o 3.3V) que va al pin 1 del controlador 2, 2) Terminal de tierra (GND) al pin 6 del controlador 3, 3) El pin SDA va al pin 3 del controlador 4, 4) El pin SCL va al pin 5, así mismo para el anemómetro analógico solo se conectan 3 cables los cuales son los siguientes: 1) Terminal de alimentación positivo (5V) que va al pin 27 del Arduino nano, 2) Terminal de tierra (GND) va al pin 29 del Arduino, 3) Señal analógica va conectado al pin 20 (A1). Por último, un sensor magnético de efecto hall que ocupa el pluviómetro 1) Terminal de alimentación positivo (3.3V) que va al pin 17 del Arduino 2, 2) Terminal de tierra (GND) va al pin 29 del Arduino 3, 3) Señal digital va al pin 16 del Arduino. Para poder alimentar los Arduino se va a conectar a la Raspberry Pi así mismo los datos se envían por el método USB.

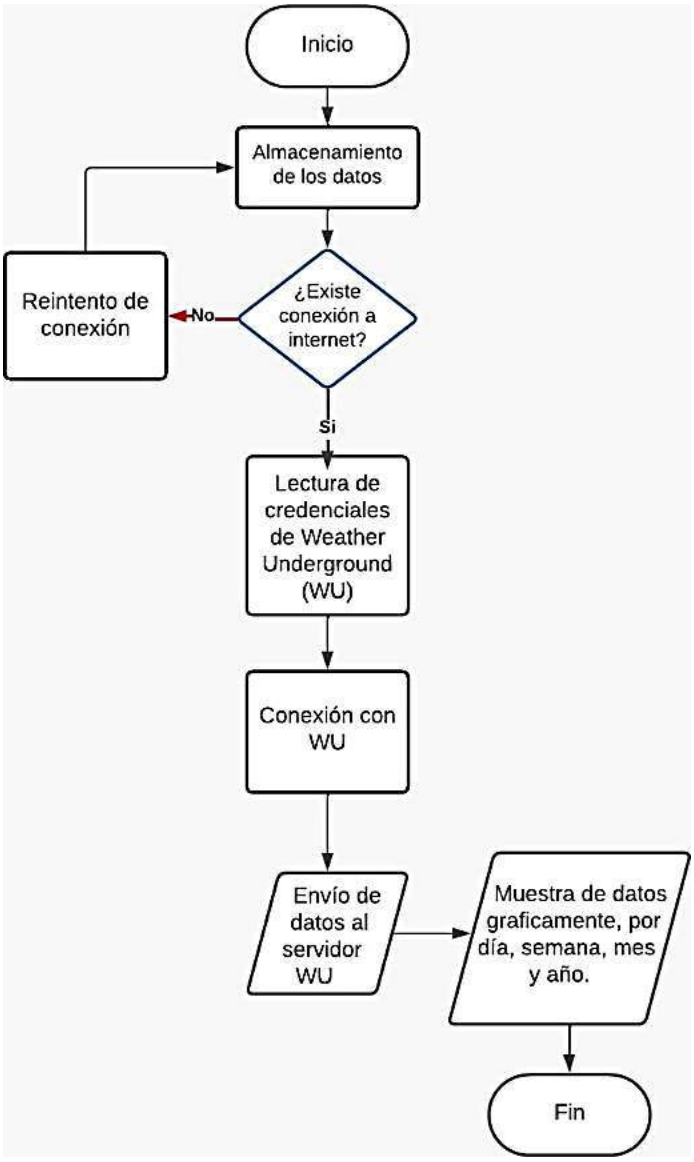


Figura 12. Algoritmo de procesamiento de datos.

Día	Hora	Temperatura °C	Presión HPa	Humedad %	Velocidad Viento m/h	Velocidad Viento km/h	Pluviometro L/m2
15/06/2023	09:46:38 p. m.	22.72237457	821.6848557	50.96861771414365	1.0934999999999968	0.30374999999999913	0.01
15/06/2023	09:51:38 p. m.	22.74841642	821.6694923	50.77818745467039	1.0934999999999968	0.30374999999999913	0.01
15/06/2023	09:56:38 p. m.	22.53847426	821.8261106	51.125874697841475	1.0934999999999968	0.30374999999999913	0.01
15/06/2023	10:01:38 p. m.	22.38061607	821.8013562	51.77834513973016	1.0934999999999968	0.30374999999999913	0.02
15/06/2023	10:06:38 p. m.	22.30184783	821.9473461	51.88980938382431	1.0934999999999968	0.30374999999999913	0.02
15/06/2023	10:11:38 p. m.	22.29348875	821.991062	52.032650200924934	1.0934999999999968	0.30374999999999913	0.02
15/06/2023	10:16:38 p. m.	22.13145146	822.0427062	52.433971744586785	1.0934999999999968	0.30374999999999913	0.02
15/06/2023	10:21:38 p. m.	21.96298443	822.053293	52.69188659413223	1.0934999999999968	0.30374999999999913	0.02
15/06/2023	10:26:38 p. m.	21.8231313	822.1014781	53.48590015017349	1.0934999999999968	0.30374999999999913	0.02
15/06/2023	10:31:39 p. m.	21.67556238	822.1718695	53.89834954095992	1.0934999999999968	0.30374999999999913	0.02
15/06/2023	10:36:39 p. m.	21.59004324	822.1804573	54.41331927298946	1.0934999999999968	0.30374999999999913	0.02
15/06/2023	10:41:39 p. m.	21.61737078	822.2523459	54.58059805301252	1.0934999999999968	0.30374999999999913	0.02
15/06/2023	10:46:39 p. m.	21.60997627	822.2374754	55.12735888706501	1.0934999999999968	0.30374999999999913	0.02
15/06/2023	10:51:39 p. m.	21.45404869	822.4128202	57.184147854088	1.0934999999999968	0.30374999999999913	0.02
15/06/2023	10:56:39 p. m.	21.22739156	822.4588633	56.90310417492636	1.0934999999999968	0.30374999999999913	0.02

Figura 13. Formato de visualización de los datos obtenidos.

Una vez hechas las conexiones correspondientes se conecta el dispositivo a alimentación y se encenderá de forma automática.

A. Raspberry Pi 4
B. Arduino Nano
C. Arduino Nano
D. BME-280
E. Anemómetro
F. Pluviómetro

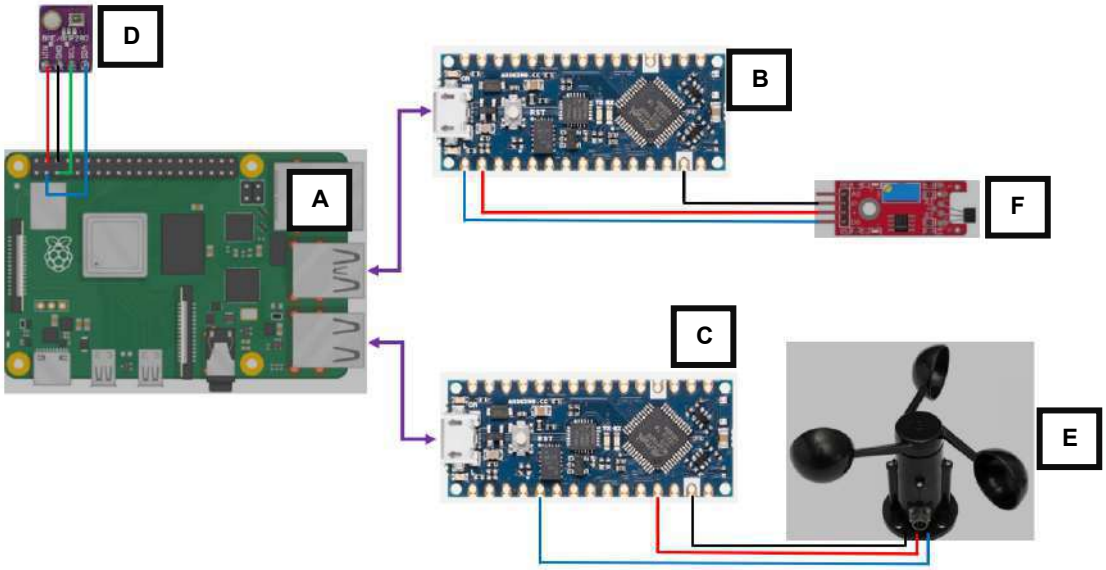


Figura 14. Implementación del hardware del prototipo. Adaptadas de [13], [14], [15].

Todos los elementos se integraron para la captura de datos conforme lo que se observa en la Figura 15, donde se observa en dos partes, los sensores que toman las mediciones en un lugar a la intemperie, mientras que la Raspberry se dejó dentro de la residencia para su monitoreo.

Figura 15. Sistema interconectado, Raspberry pi 4 dentro de la residencia y elementos de medición a la interperie

D. ENVÍO DE DATOS A LA PÁGINA WEB (IoT)

Al inicio del código se importan las librerías necesarias, después se inicializan los sensores y se preparan una variable donde se coloca la ID y la contraseña (proporcionada por la página de Weather Underground) del servidor a donde se van a mandar los datos, a continuación comienza el bucle del programa donde se solicitan los datos de la fecha, hora, temperatura, presión, humedad, velocidad del viento y precipitación, una vez obtenidos los datos mencionados, se muestran en pantalla y posteriormente se guardan en un archivo delimitado por comas (CSV), los mismos valores se mandan acomodados en una línea de código la cual crea una conexión con la dirección del servidor receptor y posteriormente se muestra en pantalla un mensaje del estado del envío siendo “Received” el mensaje

que muestra confirmando el envío a la página web de Weather Underground, como último, también se hace una espera de 5 minutos entre cada bucle.

3. Resultados

La descripción de las condiciones meteorológicas medidas por la estación es visualizable desde la página web https://www.wunderground.com/dashboard/pws/IVALLE241. El pronóstico del tiempo se muestra en la Figura 11. El resultado de la salida se compara con la información del clima reportado por la estación Davis. Se calcula el porcentaje (%) de error para el valor promedio de las variables, excepto la precipitación donde se muestra el máximo se puede ver en la Tabla 2. De la comparación, podemos ver que esta estación meteorológica produce resultados eficientes en términos de precisión y fiabilidad. También hay algunas ventajas en estos proyectos.

Tabla 2. Datos de comparación EMA Davis y EMA TESVB

VARIABLE	EMA DAVIS	EMA TESVB	PORCENTAJE DE ERROR
Temperatura	19.9°C	19.1°C	4.02%
Humedad	90%	100%	11.1%
Presión barométrica	1018hPa	813hPa	20.23%
Precipitación	0.51mm	0.5mm	1.96%

1. El sistema de mentores meteorológicos IOT está automatizado.
2. Podemos obtener información en tiempo real desde cualquier lugar con acceso a internet de la situación meteorológica.
3. Presupuesto amigable y los esfuerzos son menores en este sistema.
4. La precisión es alta, específicamente en temperatura, humedad y precipitación, en la presión barométrica se tiene un detalle reportado por la estación DAVIS al estar configurada con una altura distinta a la reportada por el municipio de Valle de Bravo de 1825 m.
5. Eficiente.

4. Conclusiones y recomendaciones

En el presente, hemos desarrollado un prototipo de EMA basándonos en el uso de una Raspberry Pi 4, el cual en contraste con los microcontroladores o PIC's que se contemplaron para su uso, permite la ejecución de procesos con mayor demanda y otra de las necesidades es el módulo wifi con el cual este microcomputador ya trae incluido anexo a otros periféricos y características como lo es la RAM y ROM. Además, que la estación meteorológica es inalámbrica y amigable con gráficos basados en software IoT de aplicación para comprobar fácilmente el tiempo información. Puede calcular temperatura, presión, humedad, pluviometría y altitud. Los resultados mostraron una buena precisión y estabilidad en comparación con otras estaciones meteorológicas económicas. Tiene una interfaz fácil de usar con un mantenimiento muy bajo. En el futuro, más mejoras como la dirección del viento y la radiación solar se pueden agregar de manera trivial gracias al uso de un sistema modular, así como la alimentación eléctrica a través de un sistema fotovoltaico que la haga portable. Con mayor investigación puede hacerse para que el sistema sea lo más barato posible.

5. Referencias

[1] F. Ureña Elizondo, «Using automatic weather stations as a new alternative for recording and data transmission,» *Revista Posgrado y Sociedad Sistema de Estudios de Posgrado Universidad Estatal a Distancia,* vol. 11, nº 1, pp. 33-49, 2011.

[2] Secretaría de Economía, NMX-AA-166/1-SCFI-2013, México: Secretaría de Economía, 2013.

[3] World Meteorological Organization (WMO), Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, Geneva: World Meteorological Organization (WMO), 2008.

[4] World Meteorological Organization (WMO), «The world climate: between 2015 and 2019 climate change has accelerated,» World Meteorological Organization (WMO), 22 septiembre 2019. [En línea]. Available: https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/el-clima-mundial-entre-2015-y-2019-se-ha-acelerado-el-cambio-clim%C3%A1tico. [Último acceso: 16 diciembre 2022].

[5] L. Priyanka y T. Sanjay, «Design of Inter-Integrated Circuit with BIST Method,» *International Journal of Science and Research (IJSR) ,* vol. 4, nº 7, pp. 625-630, 2013.

[6] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Cilmático, Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático, México: Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019.

[7] Gobierno del Estado de México, «Valle de Bravo, Pueblo Mágico,» Secretaría de Turismo del Estado de México, 8 juniio 2018. [En línea]. Available: https://edomex.gob.mx/valledebravo_magico. [Último acceso: 16 diciembre 2022].

[8] CONAGUA, «Información climatológica por estado,» 31 Enero 2022. [En línea]. Available: https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=mex.

[9] NU CEPAL, «Perspectivas de las tecnologías de telecomunicaciones y sus implicancias en los mercados y marcos regulatorios en los países de América Latina y el Caribe,» Comisión Econímica para Ámerica Latina y el Caribe, Santiago de Chile, 2009.

[10] M. Raj, S. Shukla y S. Srishti, «Design of Weather Forecast System Using Python,» de *2022 2nd International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)*, Greater Noida, India, 2022.

[11] R. Kazemi, R. Mosayebi, S. Etemadi, M. Boloursaz y F. Behnia, «Un límite de capacidad inferior de transmisión segura de datos de extremo a extremo a través de la red GSM,» de *6º Simposio Internacional sobre Telecomunicaciones (IST)*, Teherán, Irán, 2010.

[12] A. A. Radhi y F. M. M. Al-Naima, «Design of a Prototype Local Smart Weather Station Based on Wi-Fi,» de *International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT)*, Sakheer, Bahrain, 2022.

[13] FLATSOME, «BME280 Sensor de Presión Temperatura / Humedad 5V,» uelectronics, 26 septiembre 2022. [En línea]. Available: https://uelectronics.com/producto/bme280-sensor-de-presion-temperatura-humedad-5v/. [Último acceso: 23 junio 2023].

[14] Raspberry, «Raspberry Pi hardware,» Raspberry, 23 junio 2023. [En línea]. Available: https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html. [Último acceso: 2 abril 2014].

[15] mouserelectronics, «ABX00028,» mouserelectronics, 20 enero 2023. [En línea]. Available: https://www.mouser.mx/ProductDetail/Arduino/ABX00028?qs=PzGy0jfpSMtit6rnFl8mVg%3D%3D. [Último acceso: 23 junio 2023].

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 4, pp. 39 – 50
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023.

Sistema IoT para monitoreo y control de irrigación de cultivos mediante AWS

Méndez Guzmán Hugo Antonio[*,1], Miranda Tovar Miriam Magali[2], Martínez Nolasco Juan José[1] y Ángel Hernández Arturo[2]

[1]Tecnológico Nacional de México en Celaya.
Calle Antonio García Cubas 1200, Tecnológico, 38010 Celaya, Guanajuato, México.
[2]Universidad Politécnica del Bicentenario
Carretera Silao – Romita Km. 2, San Juan de Los Durán, Silao de La Victoria, Guanajuato, México
d2003027@itcelaya.edu.mx

Resumen

En este artículo, se propone un sistema para monitoreo y control de riego para cultivos basados en suelo mediante una arquitectura IoT. El objetivo principal del sistema es proporcionar al usuario información de las condiciones ambientales del cultivo que le permitan tomar decisiones informadas, así como controlar de forma remota el riego, mediante una aplicación móvil desarrollada para dispositivos Android. En este trabajo se implementa una estación meteorológica para recopilar datos ambientales como temperatura y humedad del aire y del suelo, velocidad del viento, luminosidad y presión atmosférica entre otros. La arquitectura IoT desarrollada consta de tres capas: una capa de dispositivos, una capa de red y servicios en la nube y una capa de aplicación. Las variables son monitoreadas a través de un módulo ESP32 y la información recopilada se transfiere a los servidores de AWS. En este trabajo se evalúa el costo y eficacia de implementar y mantener el sistema IoT en términos de transferencia y almacenamiento de datos con los servicios en la nube de AWS.

Palabras clave: Internet de las cosas (IoT), Monitoreo agrícola, Control de irrigación, Estación meteorológica, AWS.

1. Introducción

La agricultura desempeña un papel vital en el desarrollo de cualquier nación, constituyendo un elemento fundamental en la economía de los países [1]. Sin embargo, en el contexto actual, el campo agrícola se enfrenta a diversos desafíos y problemáticas que requieren soluciones innovadoras y eficientes.

La crisis alimentaria a nivel mundial, exacerbada por la sobrepoblación, plantea la necesidad de aumentar la producción agrícola de manera sostenible y rentable para satisfacer la creciente demanda de alimentos. Estudios han indicado que para 2050, es necesario incrementar la producción de alimentos agrícolas al menos 70% aumentando el rendimiento superficial para satisfacer la creciente demanda [2][3].

La escasez de agua dulce es uno de los desafíos más críticos que afecta a la agricultura y es una de las principales razones por las cuales la comunidad agrícola debe tener en cuenta la gestión del agua en las prácticas de riego. La irrigación requiere casi el 85% de los recursos de agua dulce disponibles [4], por lo que a medida que la demanda de agua para riego aumenta, es crucial encontrar formas de optimizar su uso y minimizar el desperdicio.

El cambio climático representa otra amenaza significativa para la agricultura, con eventos climáticos extremos y patrones que impactan negativamente en los cultivos. La temperatura media mundial tiene una tendencia de aumento lo que requiere medidas urgentes para adaptarse a esas condiciones cambiantes [5]. Además, los agricultores se enfrentan a problemas como lluvias excesivas y sequías, y en ambos casos esto puede generar una menor producción agrícola. La falta de agua, así como el exceso, pueden llevar al estrés hídrico de las plantas y a reducir su tasa de crecimiento [6]. En el caso de humedad excesiva el valor nutricional y la calidad del suelo se reducen, además el contenido de oxígeno de las raíces de los cultivos disminuye cuando el suelo se inunda con agua [7].

Los factores principales que influyen en el crecimiento de los cultivos y su productividad son los parámetros climáticos. Las estaciones meteorológicas permiten recopilar información ambiental esencial para los agricultores sobre las condiciones en que se desarrollan sus cultivos [8]. El recolectar estas variables con herramientas IoT es una buena alternativa para facilitar la recopilación de los datos y su análisis, lo cual puede ser de gran ayuda para controlar los principales procesos agrícolas como el riego y obtener cosechas de mayor cantidad y calidad. Estos datos además se pueden almacenar en un servidor remoto y se pueden utilizar para procesamientos posteriores, como el pronóstico meteorológico, el análisis del estado del suelo, la predicción del rendimiento agrícola, etc. [9].

En la agricultura tradicional, uno de los principales retos consiste en determinar el tipo, la cantidad y la frecuencia de riego según las necesidades de cada planta y de las condiciones ambientales del cultivo. Una forma indirecta de detectar las necesidades de agua es a través de la monitorización de parámetros meteorológicos y del cultivo como la temperatura y humedad del aire y del suelo, la velocidad del viento, la radiación solar, entre otros. A través de estas variables se pueden obtener parámetros como el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), la evapotranspiración (ET) y el déficit de presión de vapor (VPD).

El índice de estrés hídrico se puede calcular teóricamente a través de la medición de la radiación solar, la temperatura y la humedad en el ambiente y la temperatura del cultivo [10][11]. La evapotranspiración se puede calcular con el método FAO Penman-Monteith a través de la medición de temperatura del aire, la radiación solar, la humedad, la velocidad del viento y la presión atmosférica [12][13], o bien a través de métodos basados en temperatura [14]. El déficit de presión de vapor se puede medir a través de la temperatura de la hoja, la temperatura ambiente y la humedad relativa [15]. Además, para determinar los parámetros óptimos de riego con base en múltiples variables se pueden aplicar algoritmos de aprendizaje automático o técnicas de control como la lógica difusa [16].

Los sistemas de irrigación inteligente suelen utilizar tecnología de Internet de las Cosas (IoT) en su implementación [17]. Estos sistemas ofrecen alternativas para tareas de automatización, ya que, con el monitoreo del contenido de humedad del suelo, la temperatura y otros parámetros del campo controlan la cantidad y la frecuencia del riego, permitiendo a los agricultores gestionar eficientemente sus cultivos desde cualquier lugar [18]. Además, se pueden utilizar pronósticos meteorológicos para optimizar aún más el uso de los recursos hídricos, al determinar la cantidad de riego necesaria para los cultivos en función de las previsiones futuras. Por ejemplo, si hay altas probabilidades de lluvia, la cantidad de agua suministrada podría reducirse. En la agricultura a gran escala, esto es inmensamente útil para ahorrar agua [19].

1.1 Antecedentes

En la literatura existen múltiples propuestas referentes al monitoreo y control de riego en agricultura, entre las más relevantes se encuentran las aportaciones de Norbu, Laksiri, Agale y Gaikwa, Vanathi, Kirtana, Ma, Giri, Dutta y Neogyn, Revathi y Rajasekaran, entre otros.

Norbu et al. diseñaron e instalaron estaciones meteorológicas portátiles inalámbricas en una plantación de edamame para estudiar la influencia del microclima en el rendimiento de los cultivos. Demostraron que los parámetros del campo, como la temperatura del aire, la humedad, la humedad del

suelo y la precipitación, influyen en gran medida en el rendimiento de los cultivos y que estas variables se correlacionan estrechamente entre sí [8].

Laksiri et al. desarrollan un sistema de riego inteligente de bajo costo basado en IoT y en las condiciones climáticas. Se utiliza riego por goteo y se controla automáticamente el suministro de agua a las plantas en función de la humedad del suelo. También permite controlar manualmente el suministro de agua por parte de un usuario remoto. Integra sensores de temperatura, humedad y gotas de lluvia al sistema y permite el monitoreo de estos parámetros a través de Internet. En su propuesta implementan un algoritmo de predicción del clima para controlar el suministro de agua de acuerdo con la condición climática actual [9].

Agale y Gaikwa por su parte proponen recopilar, analizar y monitorear los datos en tiempo real de sensores de temperatura, humedad, humedad del suelo, sensor infrarrojo pasivo (PIR), etc., con la ayuda de la tecnología IoT cada 10 segundos desde el suelo y el entorno. De esta manera, las operaciones de riego se ejecutan en función de los valores umbral establecidos. Además, pone a disposición del usuario los parámetros agrícolas y del entorno desde cualquier lugar a través de Internet mediante una página web. Este proyecto conlleva beneficios como ahorro de agua, capital, riego automático de las plantas y vigilancia constante del suelo y los cultivos [20].

Vanathi et al. proponen un sistema IoT con sensores de humedad del suelo, humedad, temperatura, sensor de luz, sensores de movimiento y medidor de pH en el campo agrícola para automatizar el sistema de riego, el sistema de iluminación y también para determinar el nivel de pH del suelo. La granja puede ser monitoreada por el usuario mediante el acceso a MQTT a través de una aplicación para dispositivos móviles. Los datos se envían a un microcontrolador y se utiliza un relé para activar y desactivar los sistemas, utilizando energía solar. Si el contenido de humedad disminuye, se activa el sistema de riego. Además, se utiliza un sensor de movimiento para detectar animales intrusos, lo que activa una alarma, enciende una luz y dispara una cámara para obtener una imagen del intruso. Las actualizaciones y notificaciones se envían al teléfono móvil del agricultor [21].

Kirtana et al. implementan un sistema de riego inteligente que automatiza el proceso de riego utilizando técnicas de aprendizaje automático supervisado. Con el módulo de sensores se obtienen parámetros como la humedad del suelo, la temperatura y la humedad del aire y se transmiten a una estación base local a través de la tecnología Zigbee. En la estación base se utiliza Raspberry Pi para el cálculo y el aprendizaje. Se aborda el sistema de riego como un problema de clasificación. Una vez entrenado, el modelo de clasificación predice los requisitos de agua para los nuevos parámetros. Dependiendo de la decisión tomada por el algoritmo, se controla el funcionamiento del sistema de riego mediante tecnología de radiofrecuencia. Además, el módulo de sensores se alimenta con energía solar, lo que reduce el consumo de energía y mejora la robustez del sistema [22].

Ma et al. utilizan un sistema IoT para recopilar información de una granja, e inteligencia artificial y procesamiento de imágenes para controlar el riego. Se utilizan los datos ambientales para entrenar modelos que predigan la humedad del suelo en categorías de alta, normal y baja humedad. Una cámara captura imágenes del suelo y se importan en una red neuronal convolucional para extraer características. Luego predicen la categoría del suelo mediante el aprendizaje profundo. Los resultados se envían a un sistema de control difuso y se define el intervalo de humedad del suelo en función de la categoría del cultivo que se está plantando en él [23].

Giri, Dutta y Neogyn, abordan en su artículo la automatización en la agricultura a través de la tecnología IoT con el fin de optimizar la utilización de agua, fertilizantes e insecticidas. El sistema en la nube analiza los datos meteorológicos de los satélites y los datos almacenados de los sensores para enviar sugerencias al agricultor. También toma en cuenta el informe meteorológico del día para activar rociadores de agua [24].

Revathi y Rajasekaran utilizan un sistema de riego automatizado que consta de dos unidades: la unidad de sensor inalámbrico (WSU) y la unidad de información inalámbrica (WIU). El WSU está

compuesto por una fuente de alimentación, un transceptor RF, un sensor y un microcontrolador. Tres de estos WSU se despliegan en el campo en diferentes ubicaciones formando una red de sensores distribuida. Los datos de los sensores de humedad del suelo y temperatura se transfieren al WIU. El WIU, que consta de un microcontrolador PIC, un módulo GPRS, un relé, un motor y una bomba, y es capaz de grabar y analizar los datos del sensor para automatizar el proceso de riego. Los datos del WIU se transfieren a servidores de datos utilizando el módulo GPRS y se controlan mediante una aplicación gráfica. El sistema de gestión de batería consta de dos bancos recargables mediante energía solar, cada uno de ellos con dos baterías, para un funcionamiento continuo [25].

1.2 Propuesta de Sistema de Monitoreo y Control de Irrigación

En este trabajo se presenta una propuesta de sistema de monitoreo y control de irrigación basado en una estación meteorológica y el uso de AWS como servidor. La propuesta va orientada al monitoreo remoto y programación de la irrigación del cultivo a través de una app desarrollada en Android Studio. El objetivo de este trabajo es proporcionar una herramienta al agricultor para el análisis de condiciones ambientales y la programación del riego de forma remota. La estación meteorológica está conformada por un microcontrolador ESP32-WROOM, sensores ambientales para la temperatura y humedad ambiente y de suelo, luminosidad, presión atmosférica, velocidad del viento, así como una electroválvula para el manejo del riego y un sensor de lluvia para la desactivación automática del riego. La aplicación desarrollada para este trabajo permite revisar el estado del clima y humedad del suelo, así como programar el ciclo de riego. Toda la información generada es recopilada y almacenada en una base de datos del servidor AWS.

2. Metodología

Nuestra propuesta se basa en una arquitectura IoT de tres capas que permite recopilar algunas de las principales variables meteorológicas y del cultivo y almacenarlas en una base de datos en la nube (Figura 1). El sistema permite visualizar la información sobre estas variables desde cualquier lugar con acceso a internet a través de una aplicación para dispositivos móviles con sistema Android. Además, permite controlar el sistema de riego del cultivo de manera automática o manual de forma remota, así como el tiempo de muestreo de las variables.

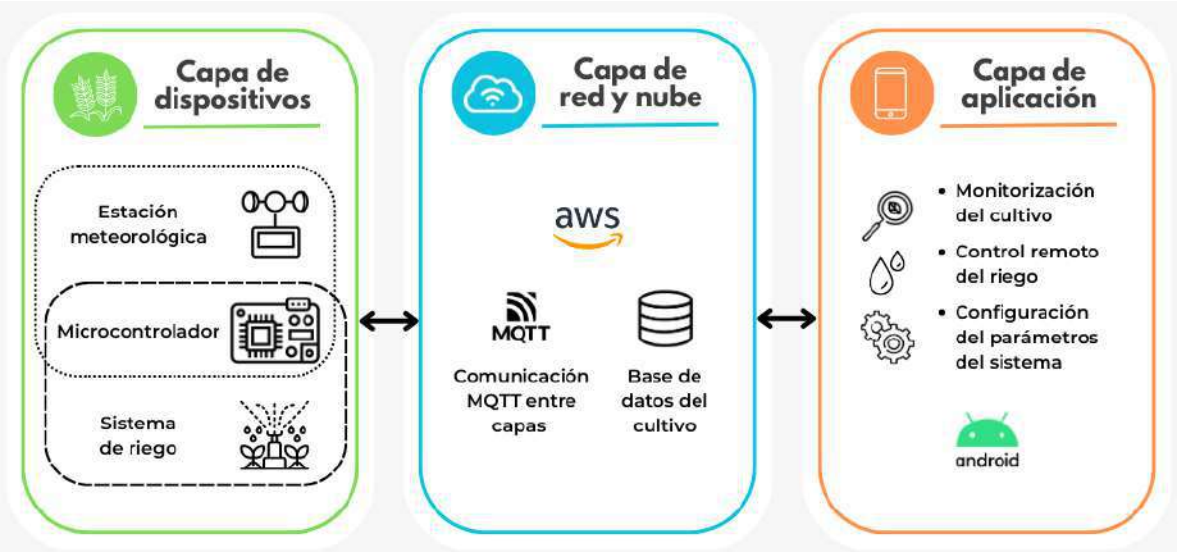


Figura 1. Arquitectura IoT del sistema propuesto.

2.1 Capa de Dispositivos

La capa de dispositivos lo conforma el sensor inteligente, el cual se compone de sensores climáticos y de suelo, así como relés (a) y electroválvula (b) del sistema de riego. Todos los dispositivos se integran en una tarjeta de circuito impreso (Figura 2) y se encuentran dentro de un gabinete impermeable para proteger los componentes electrónicos de la lluvia y las inclemencias ambientales. Además, se cuenta con un display LCD y leds indicadores, los cuales permiten conocer el valor de las variables medidas, así como visualizar el estado de la conexión Wi-Fi, de la conexión con AWS, del envío de información al respaldo local y el estado funcional sensores.

Figura 2. Sensor inteligente del sistema de monitoreo y control de irrigación propuesto.

Como microcontrolador se utilizó un módulo ESP32 (c) el cual cuenta con conectividad Wi-Fi y periféricos para entradas y salidas digitales y analógicas, el cual se conecta a través de un transformador de voltaje AC a DC de 5 V a la instalación eléctrica más cercana. Respecto a los sensores, para medir la humedad relativa y la temperatura ambiental se utilizó un módulo HTU21D (d), para medir la iluminación ambiental se empleó un módulo BH1750 (e) y para medir la presión atmosférica se utilizó un módulo BMP180 (f); estos tres dispositivos dan lecturas digitales a través del protocolo de comunicación I2C. Por otra parte, para medir la velocidad del viento se utilizó un sensor anemómetro de salida de pulsos NPN (g), para medir la humedad del suelo se utilizó un sensor de humedad del suelo (h) y para detectar la lluvia se empleó un sensor resistivo de gotas de lluvia (i); estos sensores dan lecturas analógicas. El conjunto de dispositivos de medición forma la estación meteorológica.

El sensor de presión atmosférica, así como los relevadores y el microcontrolador van dentro del gabinete. Los demás elementos van fuera del gabinete en la parte superior, a excepción del sensor de humedad del suelo que se encuentra clavado junto a una de las plantas del cultivo y de las electroválvulas. La Figura 3 muestra la ubicación de los elementos que conforman la capa de dispositivos.

El sensor inteligente además de monitorear las variables deseadas, genera un archivo CSV de respaldo para evitar pérdidas de información en caso de fallas en el servicio de Internet. De esta manera, el archivo es fácil acceso, lo cual nos permite recuperar y visualizar la información sobre las variables monitoreadas en el momento deseado. Por otra parte, el microcontrolador tiene un archivo TXT, el cual lee y escribe con la última configuración de los parámetros del sistema que recibe del usuario desde la aplicación móvil. De esta manera al reiniciarse el microcontrolador, puede comenzar a trabajar con la última configuración recibida.

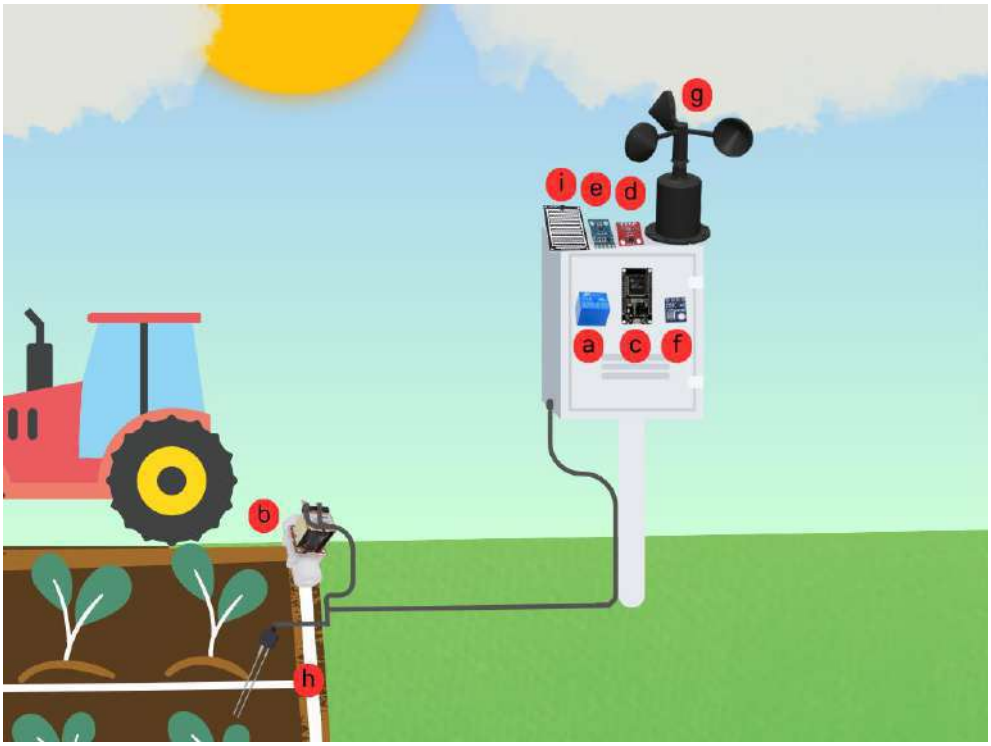


Figura 3. Localización física de elementos principales del sensor inteligente.

El sensor inteligente se encarga también del sistema de riego, el cual se configura como automático o manual según la selección del usuario a través de la aplicación móvil. En modo manual el microcontrolador activa y desactiva los relés que controlan las electroválvulas según la instrucción enviada por el usuario. En modo automático, el riego se activa en función de la tolerancia mínima establecida de humedad relativa del suelo.

2.2 Capa de Red y Nube

Esta capa se compone de los servicios de AWS que permiten la transferencia y almacenamiento de la información sobre las variables estudiadas y la configuración del sistema. El microcontrolador se conecta a AWS IoT Core a través de las credenciales correspondientes y manda los valores de las variables recopiladas en formato JSON a través del protocolo MQTT. AWS IoT Core transfiere los mensajes recibidos a una función de AWS Lambda, la cual guarda los valores en una base de datos de Amazon DynamoDB (figura 4).

Figura 4. Flujo de información en el proceso de subida y almacenamiento de datos en la nube.

En la capa de red y nube también se encuentran las API de Amazon API Gateway. Las peticiones a la API desde la aplicación móvil desencadenan las funciones de AWS Lambda encargadas de consultar la base de datos y de mandar mensajes de cambio de configuración. Cuando se consulta la

base de datos, la información solicitada se envía como respuesta a la aplicación para su visualización (figura 5).

Figura 5. Flujo de información en el proceso de consulta de la base de datos en la nube.

Por otro lado, cuando se configuran los parámetros del sistema, el mensaje se reenvía a la capa de dispositivos con AWS IoT Core a través de comunicación MQTT, para que en esta capa se realicen los cambios correspondientes. Al recibir cambios en la configuración, el microcontrolador también realiza el proceso de subida y almacenamiento de datos con los nuevos parámetros, lo que le permite al usuario conocer si sus cambios fueron efectuados (figura 6).

Figura 6. Flujo de información en el proceso de configuración de los parámetros del sistema.

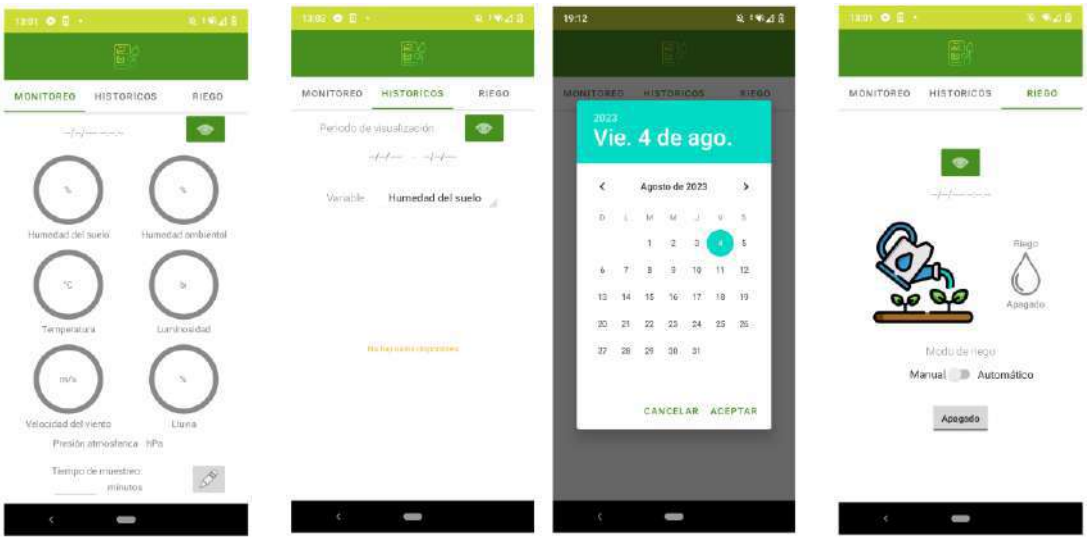
2.3 Capa de Aplicación

Con el fin de monitorear las variables registradas por la estación meteorológica, configurar el sistema y programar el sistema de riego de forma remota, se desarrolló una aplicación para celular en Android Studio que permite al usuario visualizar los datos desde cualquier lugar con conexión a internet. La aplicación también permite configurar el tiempo de muestreo de las variables, así como controlar el sistema de riego entre forma manual y automática. La aplicación móvil posee 3 ventanas principales, la ventana de monitoreo, históricos y control de riego, cada una descrita a continuación.

- Ventana de monitoreo: Esta ventana permite conocer el último valor registrado de las variables estudiadas. Tiene un botón para acceder a la configuración del tiempo de muestreo donde se puede ingresar el tiempo requerido en minutos (figura 7a).

- Ventana de históricos: Esta ventana muestra gráficos de cada una de las variables recopiladas en las que se desarrolla el cultivo. Se puede seleccionar el periodo de visualización deseado (figura 7b).

- Ventana de control de riego: Esta ventana permite conocer el último estado registrado del sistema de riego, es decir si se está o no regando el cultivo. También nos permite seleccionar entre el modo de riego automático o manual. El modo manual nos permite activar o desactivar a voluntad las electroválvulas del sistema de riego de forma remota. Mientras que el modo automático controla el riego de acuerdo con un valor mínimo establecido de humedad relativa del suelo, el cual también puede configurarse desde la ventana (figura 7c).



(a) (b) (c)

Figura 7. Ventanas de la aplicación móvil. a) Ventana de monitoreo, b) Ventana de históricos, c) Ventana de control de riego.

3. Resultados

Con la finalidad de probar el sistema propuesto, se montó la estación meteorológica (figura 8) y el sistema de riego en el campo experimental de cultivo de Ingeniería en Agrotecnología de la Universidad Politécnica del Bicentenario en Silao, Guanajuato, México. El sistema de riego se puso a funcionar con parámetros iniciales de modo de riego manual y en estado apagado y en caso de activar el modo automático se estableció una tolerancia mínima de humedad del suelo del 85%. El tiempo de muestreo del estado de las variables ambientales y del cultivo fue establecido en 5 minutos.

(a) (b)

Figura 8. Dispositivos del sistema IoT en funcionamiento, a) Montaje de estación meteorológica, b) Vista interior con el sensor inteligente.

Durante el tiempo de experimentación se mantuvo estable la conexión a Internet y toda la información enviada por la capa de dispositivos fue recibida en la capa de red y nube por los servicios de AWS, lo cuales trabajaron correctamente. Se logró almacenar los valores de las variables en la base de datos y a través de la aplicación móvil se pudo monitorear las condiciones meteorológicas y de cultivo de la zona. En la figura 9 se presenta una muestra de la visualización de las variables recopiladas y de los parámetros del sistema.

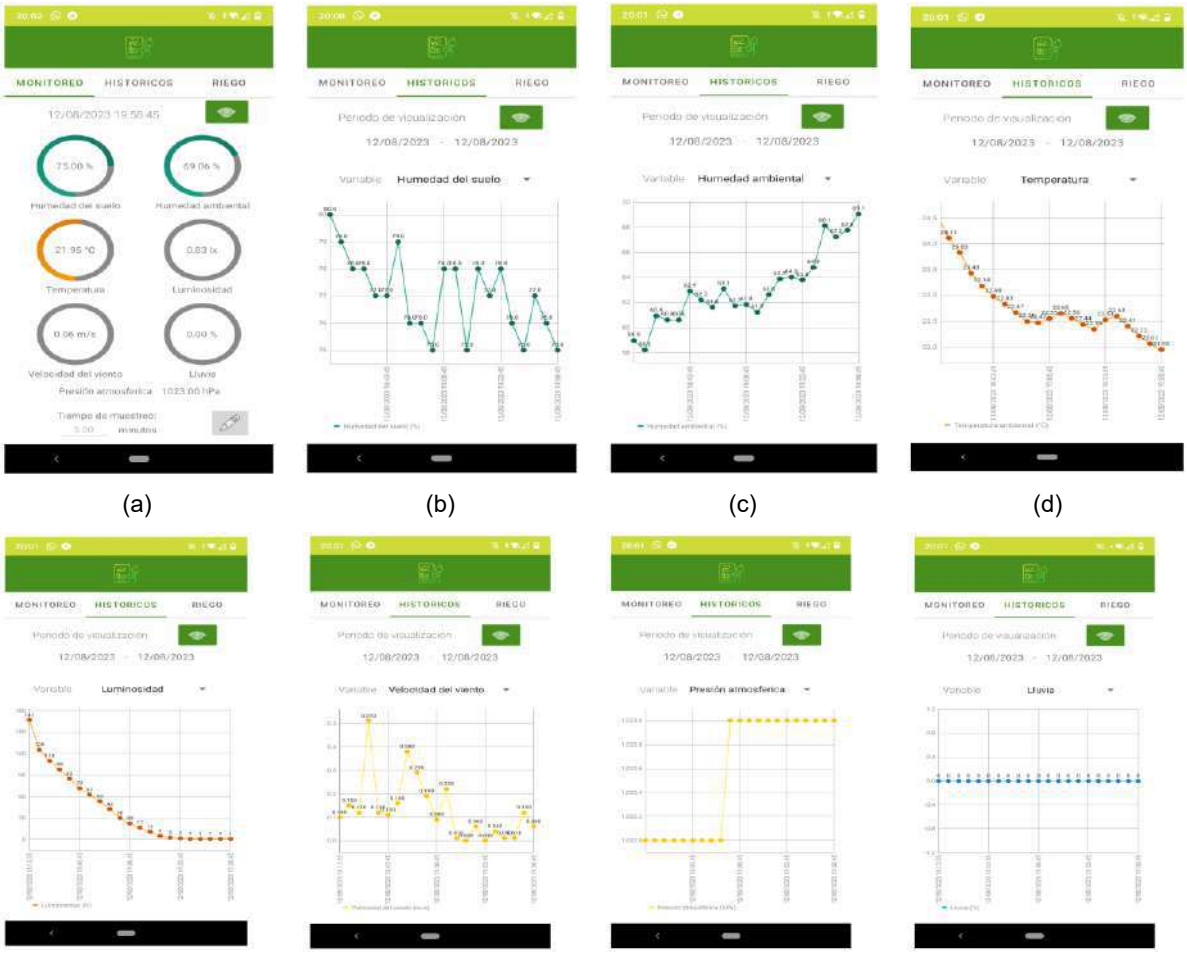


Figura 9. Ejemplo de visualización en la aplicación móvil de las variables meteorológicas y de cultivo registradas y del estado de los parámetros del sistema en el periodo de experimentación. a) Ultimo valor registrado de las variables monitoreadas y tiempo de muestreo actual, gráficas del histórico de los valores de b) humedad relativa del suelo, c) humedad relativa ambiental, d) temperatura ambiental, e) luminosidad, f) velocidad del viento, g) presión atmosférica a nivel del mar, h) lluvia relativa.

3.1 Costos de la transferencia y almacenamiento de datos del sistema propuesto

AWS proporciona una herramienta para estimaciones de precios llamada AWS pricing calculator [26]. En ella podemos estimar el costo de cada uno de los servicios empleados con base en las predicciones de uso. Para AWS IoT Core usando 1 dispositivo y mensajes MQTT, se facturaría la conectividad, la mensajería y el motor de reglas. Los mensajes se miden en incrementos de 5 kB. Cada minuto de conexión cuesta 0.00000008 USD, cada mensaje cuesta 0.000001 USD, cada regla disparada cuesta 0.00000015 USD y cada acción ejecutada por regla cuesta 0.00000015 USD.

Para Amazon API Gateway usando protocolo REST, se factura según el número de solicitudes. Cada solicitud cuesta 0.0000035 USD. Para AWS Lambda se factura según la cantidad de solicitudes, la duración de cada solicitud y la cantidad de memoria asignada. Los precios son 0,0000166667 USD por GB/S de cómputo y 0.0000002 USD por solicitud. Y para Amazon DynamoDB, el costo es de 0.25 USD por GB de almacenamiento de datos.

Sin embargo, AWS ofrece una capa gratuita, donde nos aplican dos tipos de ofertas disponibles. AWS IoT Core y Amazon API Gateway ofrecen la capa gratuita durante 12 meses después de la fecha de registro inicial en AWS. Mientras que AWS Lambda y Amazon DynamoDB ofrecen una capa gratuita para siempre.

AWS IoT Core ofrece sin costo por mes 500,000 mensajes publicados o entregados, 2,250,000 minutos de conexión, 225,000 operaciones de registro o sombra de dispositivo, 250,000 reglas desencadenadas y 250,000 acciones ejecutadas. Amazon API Gateway ofrece 1 millón de llamadas a la API recibidas al mes gratis. AWS Lambda incluye 1 millón de solicitudes y 400,000 GB/s de tiempo de cómputo gratuitas al mes. Amazon DynamoDB ofrece gratuitamente al mes 25 GB de almacenamiento, 25 unidades de capacidad de escritura (WCU) aprovisionada y 25 unidades de capacidad de lectura (RCU) aprovisionada, lo que es suficiente para manejar hasta 200 millones de solicitudes por mes.

Lo que ofrece la capa gratuita es más que suficiente para nuestro uso estimado. Siendo totalmente gratuito el uso de los servicios de AWS durante el primer año. Después de esto el costo al mes estimado con AWS pricing calculator muestra que el precio al mes seria de 0.05 USD, dando un costo al año de 0.6 USD, es decir, aproximadamente 12 pesos (Figura 10).

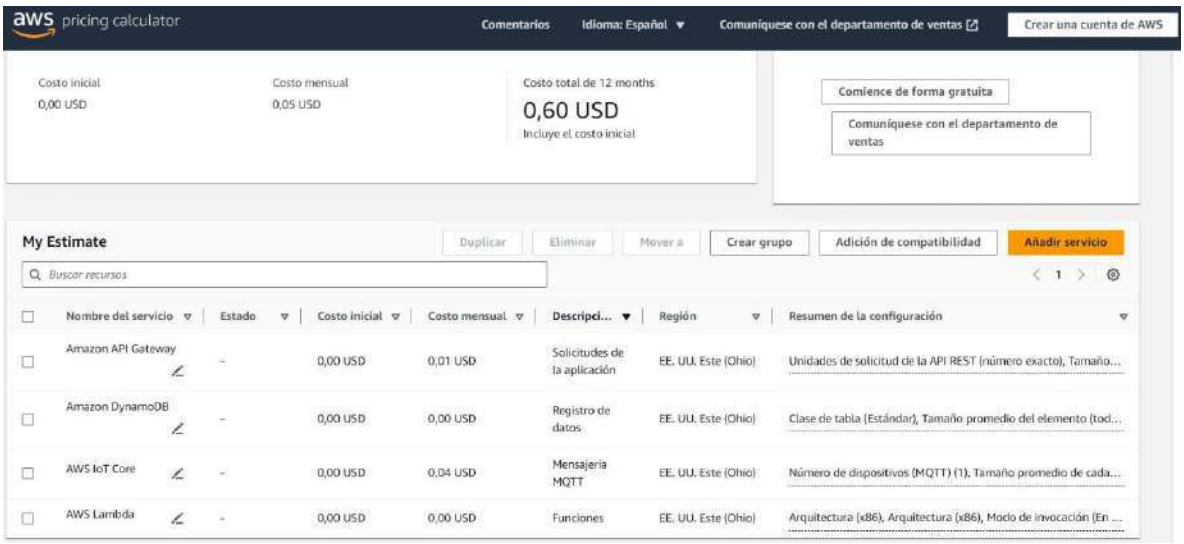


Figura 10. Estimación del costo mensual y anual de la capa de red y nube del sistema propuesto con AWS Pricing Calculator.

4. Discusión y Conclusiones

En el presente trabajo se probó el funcionamiento del sistema IoT propuesto para monitoreo y control de riego del cultivo con la finalidad de evaluar su eficiencia en términos del costo y rendimiento de la transferencia y el almacenamiento de datos. La solución planteada consiste en una arquitectura IoT que utiliza los servicios en la nube de AWS. El utilizar AWS en la capa de red y nube permite que sea robusta, segura y escalable. Además, nos evita el uso de servidores físicos y de bases de datos locales, los cuales implican el costo del hardware, el mantenimiento, la administración y la

implementación de medidas de seguridad para proteger los datos y la infraestructura en caso de fallos del sistema.

Los resultados experimentales evidencian que utilizar AWS facilita la gestión del proceso de transferencia y almacenamiento de información a costos muy accesibles. AWS juega un papel fundamental en la transformación de la agricultura tradicional en una agricultura más inteligente y sostenible.

Diversos estudios utilizan la evapotranspiración, la previsión meteorológica o la humedad relativa para determinar las condiciones de riego optimas en un cultivo. Este sistema permitirá al usuario obtener la información necesaria para estudiar el impacto de las variables meteorológicas y de humedad del suelo en los resultados del cultivo, así como permitir determinar las necesidades de riego de los cultivos mientras se desarrollan a través del cálculo de parámetros o de la visualización directa de las variables recolectadas.

En la propuesta que se presenta en este trabajo, se cuenta con una aplicación móvil que no solo accede a los datos monitoreados del cultivo, sino que permite la configuración remota de parámetros del sistema como el tiempo de recolección de los datos, el modo del sistema de riego entre automático y manual, la tolerancia mínima de humedad de suelo para el riego automático y el encendido o apagado de las electroválvulas en modo manual. Esta propuesta aún no incorpora alertas en caso de fallas del sistema o de valores de las variables monitoreadas que superen algún umbral; sin embargo, la arquitectura desarrollada presenta la flexibilidad de incorporar servicios adicionales de monitoreo y control. También es posible que el sistema trabaje con otros sensores que el usuario considere importantes o que le permitan calcular otros parámetros del cultivo.

Se considera como trabajo a futuro la incorporación de una función que calcule y presente el resultado y la interpretación de la evapotranspiración diaria del cultivo para el usuario final, de tal forma de contar además del riego automático con otra herramienta que oriente al usuario para la administración del riego.

Referencias

[1] Granda-Cantuna, J., Molina-Colcha, C., Hidalgo-Lupera, S. E., Valarezo-Varela, C. D. (2018). Design and implementation of a wireless sensor network for precision agriculture operating in api mode.
[2] Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2017). Planeación agrícola nacional 2017–2030. Sitio web:
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/255627/Planeacion Agricola Nacional 2017-2030-parte uno.pdf
[3] Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M. and Toulmin, C. (2010). Food security: The challenge of feeding 9 billion people, vol. 327.
[4] Barkunan, S. R., Bhanumathi, V. and Sethuram, J. (2019). Smart sensor for automatic drip irrigation system for paddy cultivation, Computers and Electrical Engineering, vol. 73.
[5] Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M. and Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants: An overview.
[6] Marshall, R. H. (1988). Environmental factors affecting plant productivity in. In Fort Keogh research symposium, Vol. 1, pp. 27-32.
[7] Kassim, M. R. M., Mat, I. and Harun, A. N. (2014). Wireless sensor network in precision agriculture application.
[8] Norbu, J., Pobkrut, T., Siyang, S., Khunarak, C., Namgyel, T. and Kerdcharoen, T. (2018). Wireless sensor networks for microclimate monitoring in edamame farm.
[9] Laksiri, H. G., Dharmagunawardhana, H. A. and Wijayakulasooriya, J. V. (2019). Design and optimization of iot based smart irrigation system in srilanka.
[10] Kumar, N., Poddar, A., Shankar, V., Ojha, C. S. P. and Adeloye, A. J. (2020). Crop water stress index for scheduling irrigation of indian mustard (brassica juncea) based on water use efficiency considerations, Journal of Agronomy and Crop Science, vol. 206.

[11] Jamroen, C., Komkum, P., Fongkerd, C. and Krongpha, W. (2020). An intelligent irrigation scheduling system using low-cost wireless sensor network toward sustainable and precision agriculture, IEEE Access, vol. 8.
[12] Gong, X., Wang, S., Xu, C., Zhang, H. and Ge, J. (2020). Evaluation of several reference evapotranspiration models and determination of crop water requirement for tomato in a solar greenhouse, HortScience, vol. 55.
[13] Amitrano, C., Rouphael, Y., Pannico, A., Pascale, S. D. and Micco, V. D. (2021). Reducing the evaporative demand improves photosynthesis and water use efficiency of indoor cultivated lettuce, Agronomy, vol. 11.
[14] Poyen, P., Faruk & Ghosh, Apurba & Kundu. (2018). Temperature based ET Method Selection for Burdwan District in WB, INDIA. International Journal of Applied Engineering Research. 13. 12753-12763.
[15] Puengsungwan, S. and Jirasereeamornkul, K. (2020). Iot based root stress detection for lettuce culture using infrared leaf temperature sensor and light intensity sensor, Wireless Personal Communications, vol. 115.
[16] Abioye, E. A., Hensel, O., Esau, T. J., Elijah, O., Abidin, M. S. Z., Ayobami, A. S., Yerima, O. and Nasirahmadi, A. (2022). Precision irrigation management using machine learning and digital farming solutions.
[17] Garcia, L., Parra, L., Jimenez, J. M., Lloret, J. and Lorenz, P. (2020). Iot-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and iot systems for irrigation in precision agriculture.
[18] Kassim, M. R. M. (2020). Iot applications in smart agriculture: Issues and challenges.
[19] Susmitha, A., Alakananda, T., Apoorva, M. L. and Ramesh, T. K. (2017). Automated irrigation system using weather prediction for efficient usage of water resources, vol. 225.
[20] Agale, R. R. and Gaikwad, D. P. (2018). Automated irrigation and crop security system in agriculture using internet of things.
[21] Vanathi, K. L., Jayageetha, J., Narmatha, S., Kiran, M. and Kumar, J. P. (2020). Smart monitoring and management system for efficient cultivation.
[22] Kirtana, R. N., Bharathi, B., Priya, S. K., Kavitha, S., Keerthana, B. and Kripa, K. (2018). Smart irrigation system using zigbee technology and machine learning techniques.
[23] Ma, Y. W., Shi, J. Q., Chen, J. L., Hsu, C. C. and Chuang, C. H. (2019). Integration agricultural knowledge and internet of things for multi-agent deficit irrigation control, vol. 2019-February.
[24] Giri, A., Dutta, S. and Neogy, S. (2017). Enabling agricultural automation to optimize utilization of water, fertilizer and insecticides by implementing internet of things (iot).
[25] Revathi, P. and Rajasekaran, C. (2015). Energy efficient wireless monitoring system for agarian areas in indian agricultural system using gprs module.
[26] AWS Pricing Calculator. Sitio web: https://calculator.aws/#/.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 5, pp. 51 – 61
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023.

Control inalámbrico mediante tecnología IOT para direccionar el movimiento de un motor trifásico de 5hp

León Zambrano Reyna, Fernando Clemente Covarrubias Velazquez, Marco Antonio Silva de León, Gabriel González de la Rosa, Isaías Torres Campos, Josué Gómez Casas, Carlos Rodrigo Muñiz Valdez y Juan Carlos Ortiz Cuellar

Facultad de Ingeniería UAdeC Arteaga, Coahuila México
*J. Gómez Casas: jogomezc@uadec.edu.mx.

Resumen

En la actualidad el uso de la inteligencia artificial se ha abierto paso en actividades cada vez más cotidianas en nuestras vidas. Las aplicaciones de sistemas inteligentes radican su basa en el avance en la ciencia de datos, conexiones inalámbricas y aplicaciones de robótica, mejorando la calidad de vida del ser humano a través de procesos automáticos con mayor autonomía. Dentro de los avances tecnológicos en la última década, el internet de las cosas (IOT, por sus siglas en inglés) brinda la oportunidad de una interconectividad entre distintos dispositivos como computadores, teléfonos celulares, sensores y actuadores, facilitando las interfaces de usuario-máquina y el monitoreo de procesos a través de la respuesta histórica de sus datos. El objetivo de este trabajo es realizar una metodología para el control inalámbrico de giro de un motor trifásico con capacidad de 5hp utilizando la tecnología IOT, así como el monitoreo de los datos de su velocidad angular. Demostrando que cualquier sistema análogo se puede convertir a un sistema inteligente de fácil manejo y monitoreo. Para lograr la implementación de este proyecto se realizó el desarrollo del set experimental en el laboratorio. Para valorar el desempeño del control inalámbrico del giro del motor trifásico utilizando la tecnología IOT se realizaron tres experimentos. En el primer experimento se demuestra el encendido del motor con giro de la flecha hacia la derecha. En el segundo experimento se demuestra el cambio de giro de la flecha del motor de lado derecho a izquierdo y viceversa. Por último, en el tercer experimento se prueba la respuesta del motor ante perturbaciones mecánicas en la flecha para demostrar el monitoreo de falla en el motor.

Palabras clave: internet de las cosas, motor trifásico, cambio de giro, control vía wifi, red inalámbrica.

1. Introducción

En la actualidad las aplicaciones y usos de la industria 4.0 han ganado atención en sectores de la inversión privada, centros de investigación e innovación por su versatilidad para abordar problemas de automatización cada vez con mayor exigencia [1, 2, 3, 4]. Además, el desarrollo de tecnologías basadas en la ciencia de datos, conectividad inalámbrica y robótica brinda mayor autonomía en procesos de automatización con aplicaciones domésticas, comerciales, industriales y de logística en nuestra sociedad [5, 6, 7, 8]. Adicional a lo anterior, el avance en los equipos de cómputo, sensores y actuadores en la última década permite la recepción, envió, almacenamiento y procesamiento de gran cantidad de datos de forma instantánea para encarar los requerimientos actuales de la sociedad, hacia sistemas basado en inteligencia artificial [9,10].

Por otra parte, el uso de tecnologías de control inalámbrico ayuda a la optimización de estos procesos. En el caso específico, en los últimos treinta años el internet se ha convertido en una herramienta prioritaria en la vida cotidiana de la sociedad. Por lo que, la automatización se ha visto en la necesidad global de integrar la comunicación vía internet para procesos inteligentes, autónomos e

inalámbricos en la industria. De ahí surge la tecnología IOT (por sus siglas en inglés Internet Of Things) que busca la interconexión de objetos con usuarios vía inalámbrica como se presenta en [11]. Aunado a lo anterior, IOT brinda la oportunidad de una interconectividad entre distintos dispositivos como computadoras, teléfonos celulares, sensores y actuadores facilitando la comunicación entre ellos en tiempo real para crear interfaces de usuarios más sencillas [12,13].

Durante décadas, el control de procesos se realizaba de manera manual basado en la presencia y experiencia del operador a cargo, lo que se vuelve poco práctico para las necesidades de automatización actuales que requieren mayor autonomía, ahorro energético, adaptabilidad y reducción de tiempos del mantenimiento [14]. Convencionalmente, el control manual de sistemas representa una desventaja sobre las distintas aplicaciones tecnológicas automáticas actuales. En contraste, el uso de las tecnologías basado en IOT permite la adquisición y control de datos de manera inalámbrica facilitando el monitoreo de procesos en el ámbito industrial, doméstico y educativo [15,16]. De lo anterior nace la motivación de este trabajo, por lo que el objetivo es realizar una metodología para el control inalámbrico de giro de un motor trifásico con capacidad de 5hp utilizando la tecnología IOT.

Los motores trifásicos son ampliamente utilizados en el sector industrial debido a que es impulsado por tres corrientes alternas de la misma frecuencia, los cuales alcanzan sus valores máximos de forma alternada. Esto resulta en una transferencia constante de potencia durante cada ciclo produciendo un campo magnético rotatorio en el motor. Por lo anterior, los motores trifásicos tienen una gran aplicación en ventiladores industriales, montacargas, grúas y elevadores. Sin embargo, el uso de motores trifásicos en procesos industriales depende de la supervisión y control manual de un operador, poniendo en riesgo la seguridad y ergonomía del operador. Este tipo de control basado en la experiencia del operador se vuelve incompetente ante la demanda actual de proceso automáticos donde se busca una planeación de mantenimiento y detección de fallas mejorando la vida útil del motor mediante el registro de datos de operación [17,18].

Para la implementación del control inalámbrico de giro del motor trifásico, el sistema de relevadores es controlado por un Particle Photon, el cual es un dispositivo de tecnología IOT. Este permite el control del motor trifásico de manera inalámbrica mediante una red wifi. El uso de la tecnología IOT para el control de giro de un motor trifásico de 5 hp facilita la accesibilidad, el ahorro de recursos y aprovechamiento tiempo en los sistemas mejorando la productividad en el ámbito industrial.

La estructura de este trabajo es la siguiente: la sección 2 presenta una revisión del uso y aplicaciones de las tecnologías IOT, la sección 3 muestra el desarrollo experimental del control de giro inalámbrico del motor, la sección 4 describe los resultados obtenidos y la sección 5 resume las conclusiones de este trabajo.

2. Tecnologías IOT.

En la actualidad la automatización de sectores industriales es comandada por las tecnologías IOT [19]. El uso de esta basa el éxito de sus proyectos entre la comunicación máquina a máquina en procesos inteligentes [20]. Además, el uso de tecnologías IOT permiten el uso de datos masivos creando redes de intercomunicación entre sensores y actuadores de manera inalámbrica en aplicaciones de dispositivos inteligentes de bajo costo y de alta exactitud en envíos de datos [21]. Este tipo de tecnologías es una alternativa para procesos en el uso de informática de bajo costo. IOT tiene un amplio campo de aplicaciones altamente aprovechables en diferentes áreas como se muestra a continuación.

- Industria: En esta área es útil ya que se manejan cantidades masivas de datos que se pueden utilizar para el mejoramiento de cadenas de suministro, inventario y control de calidad. En lo que respecta a la industria 4.0 el uso de las tecnologías IOT permiten intercomunicar una gran cantidad de datos en tiempo real logrando sistemas de automatización más flexibles y autónomos [22].

- Seguridad: IOT ofrece la obtención de datos en tiempo real, lo que permite predecir los tiempos de mantenimiento de los equipos para evitar futuros daños o accidentes. El desafío actual de las

tecnologías IOT es la estandarización de sus protocolos para reducir problemas con la intercomunicación y el procesamiento de datos entre dispositivos como es presentado por [23,24]. Por otra parte, el uso de tecnología IOT muestra vulnerabilidad en el robo de datos, por lo que intervienen factores jurídicos tecnológicos y empresariales [25,26].

- Medicina: En la actualidad, se dispone de una amplia gama de tecnologías de Internet de las Cosas (IOT) en el ámbito de la atención médica. Un ejemplo destacado es la capacidad de realizar un seguimiento en tiempo real de los pacientes, lo que facilita la recopilación de datos a través de la monitorización de sus signos vitales. Además, las tecnologías IOT en el campo de la salud permiten la recopilación continua de datos, lo que posibilita un control constante de nuestra salud. Esto cobra una importancia crucial dado que existen enfermedades que pueden resultar mortales sin un monitoreo adecuado [27,28].

- Educación: Las tecnologías de Internet de las Cosas (IOT) han provocado un cambio de paradigma significativo en el ámbito educativo, transformando la forma en que se abordan las lecciones en las aulas. Estas tecnologías no solo desempeñan un papel importante en la enseñanza, sino que también se han convertido en herramientas didácticas y prácticas esenciales para el uso de equipos de laboratorio. La integración de IOT en la educación ha permitido que los estudiantes adquieran una comprensión más profunda de conceptos complejos a través de experiencias prácticas en tiempo real. Los dispositivos IOT, como sensores y dispositivos conectados, se utilizan para recopilar datos y proporcionar información precisa y actualizada. Esto enriquece la enseñanza al brindar ejemplos tangibles y ejercicios prácticos que ilustran conceptos teóricos de manera efectiva [29,30].

- Agricultura: En esta área ayuda en el conocimiento detallado de los cultivos con la finalidad de crear granjas inteligentes. En referencia, [31] identificó áreas de oportunidad de las tecnologías IOT para una amplia gama de soluciones a problemas actuales en sectores agroindustriales y ambientales. En [32] desarrollaron un sistema de monitoreo de plantas frutales basado en la tecnología IOT demostrando su utilidad en áreas agrícolas. El uso de IOT permite el monitoreo de variaciones en las cosechas provocadas por cambios climáticos, daños por plagas y cualquier daño externo que desfavorece el bienestar de las plantas. La vigilancia constante del ciclo de vida de las plantas mejora la calidad de las cosechas mediante un manejo de recursos de manera sustentable [33,34].

Por lo que respecta a este trabajo, el uso de plataformas basadas en la comunicación de tecnologías IOT permite el monitoreo de motores industriales a través de la lectura de sus parámetros en tiempo real, de esta manera se mejora la detección de fallas debido a la sobre limitación de los valores de corriente, voltaje, temperatura y velocidad [38].

Los protocolos de la plataforma de tecnologías IOT son empleadas para monitorear y diagnosticar fallas en motores de inducción en la industria a través de la lectura de su base de datos como han reportado en [39]. Además, [40] reportaron un estudio para detectar y predecir desviaciones de los parámetros de operación normales de un motor industrial antes de que ocurra una falla. Con lo anterior se evita que el proceso de producción no se vea obstaculizado y el mantenimiento pueda realizarse con la menor interrupción posible. En [41] presentaron una metodología de monitoreo y control inalámbrico basado en IOT para determinar las condiciones de motores de inducción empleando un módulo de sensores para monitorear: corriente, voltaje, temperatura y velocidad.

3. Configuración experimental.

La metodología empelada en la Figura 1 para el control inalámbrico de un motor trifásico de 5 hp mediante tecnologías IOT consta de las siguientes etapas: investigación de la tecnología IOT, diseño de circuitos, programación, integración y pruebas de funcionamiento del motor.

Figura 1. Esquema de la metodología empleada para el control del motor trifásico de 5hp utilizando tecnología IOT.

3.1 Diagrama y conexiones.

Para conectar un motor siguiendo estos pasos, primero debes identificar las tres terminales de entrada del motor, generalmente etiquetadas como U, V y W, así como las tres terminales de salida del motor, que también son U, V y W. Una vez identificadas, sigue estos pasos:

1. Conecta las terminales de entrada del motor (U, V, W) a las terminales correspondientes del relevador. Esto permitirá que el relé controle la dirección del flujo de corriente hacia el motor.

2. Luego, conecta las terminales de salida del motor (U, V, W) a las terminales de salida del relevador correspondientes. Esto completará el circuito de potencia desde el relevador hasta el motor.

Al seguir estos pasos, aseguras que el motor esté correctamente conectado y que el relevador pueda controlar su funcionamiento al dirigir la corriente de manera adecuada.

Adicionalmente, es fundamental resaltar que la técnica de cambiar de configuración de estrella a triángulo se utiliza ampliamente en el arranque de motores trifásicos. Esta estrategia ofrece la ventaja de reducir la corriente inicial de arranque, lo que contribuye a aliviar la carga en la red eléctrica y proteger el motor, especialmente en aplicaciones industriales que emplean motores de alta potencia.

Para realizar la demostración del control vía inalámbrica mediante el uso de tecnología IOT se utilizó un motor trifásico de inducción de la marca Siemens a 60 Hz y con una potencia nominal del 85%. Para lograr el control de dirección de un motor trifásico es necesario invertir dos de sus líneas de las fuentes de alimentación. Por lo que, se requiere de dos contactores: uno para direccionar el giro a la derecha y otro para direccionar el giro a la izquierda. Sin embargo, para lograr una conexión segura se debe evitar cruzar las líneas de alimentación previniendo un corto circuito. La Figura 2 muestra el diseño del diagrama eléctrico, dependiendo del contactor energizado se puede seleccionar el giro del motor.

Además, cabe hacer énfasis que los botones de arranque y paro serán reemplazados por las señales enviadas por el particle photon (dispositivo IOT) para realizar el control del motor de forma inalámbrica.

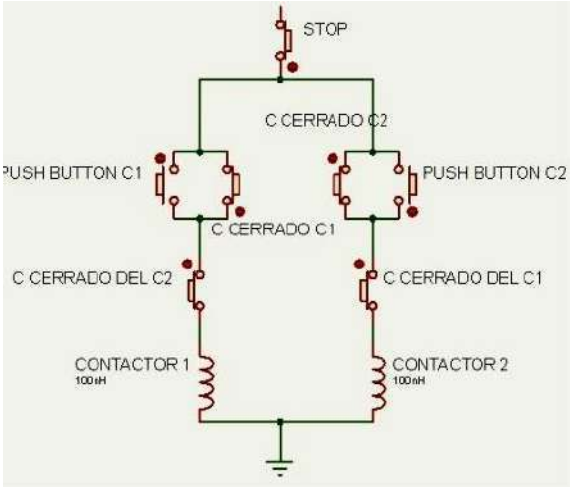


Figura 2. Diagrama eléctrico de las conexiones de contactores en el motor trifásico de 5 hp.

3.2 Conexiones inalámbricas.

Para realizar el control inalámbrico del motor mediante una computadora se utilizó un kit de desarrollo wifi para crear proyectos del Internet de las cosas (IOT) conocido como Particle Photon. Este dispositivo es conectado a una red de internet wifi, por lo que se realiza la programación para mandar las señales del giro del motor de manera inalámbrica al módulo de relevadores en el tablero de operación como se puede aprecia en la Figura 3. Como primer paso declaramos las variables para identificar las señales enviadas al módulo de relevadores, los cuales controlaran los contactores. Por lo que, se realiza la programación para mandar las señales del giro del motor de manera inalámbrica. Después, se da la instrucción de las condiciones iniciales del sistema, para seguir con cada una de las combinaciones de estas tres señales dependiendo al comando que se requiera como lo es: el paro del motor, giro a la derecha o giro a la izquierda como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 4.

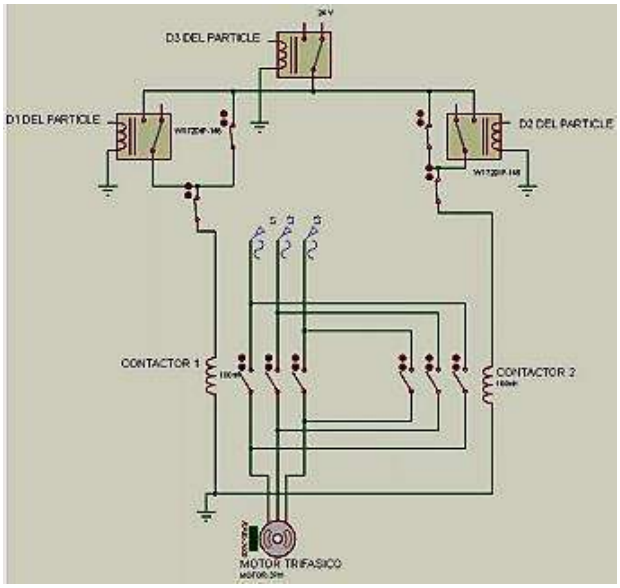


Figura 3. Diagrama eléctrico de conexión de interfaz entre el motor trifásico y el dispositivo Particle Photon.

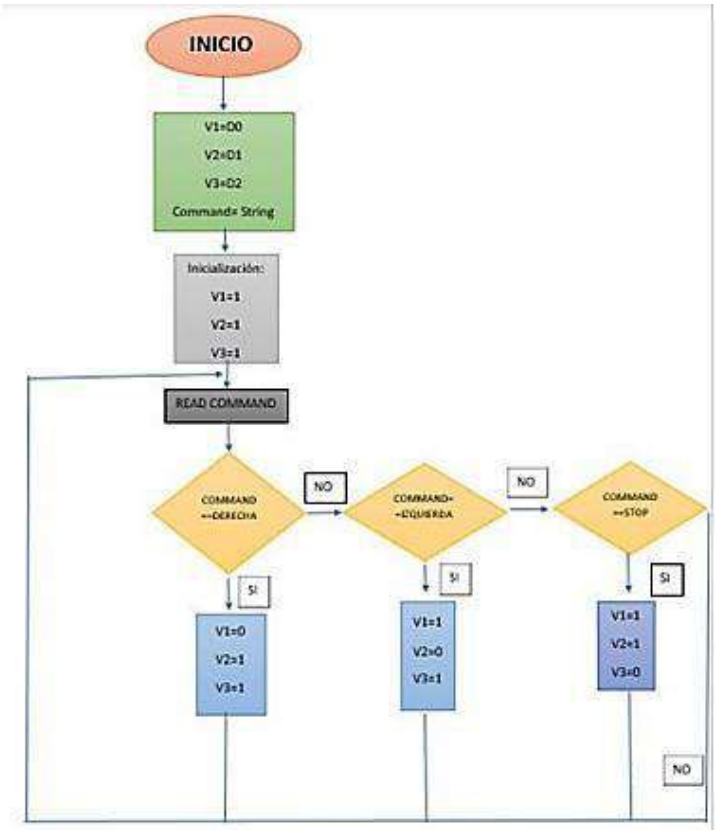


Figura 4. Diagrama de flujo del funcionamiento del programa cargado al Particle Photon.

Una vez realizada la conexión del circuito entre el motor trifásico y el dispositivo Particle Photon, se conecta el motor de 5hp a una pastilla eléctrica de 24 volts para su protección, esto a su vez es conectado al módulo de relevadores controlados por el des- positivo Particle Photon para realizar las pruebas del funcionamiento de la metodología propuesta como se muestra en la Figura 5.

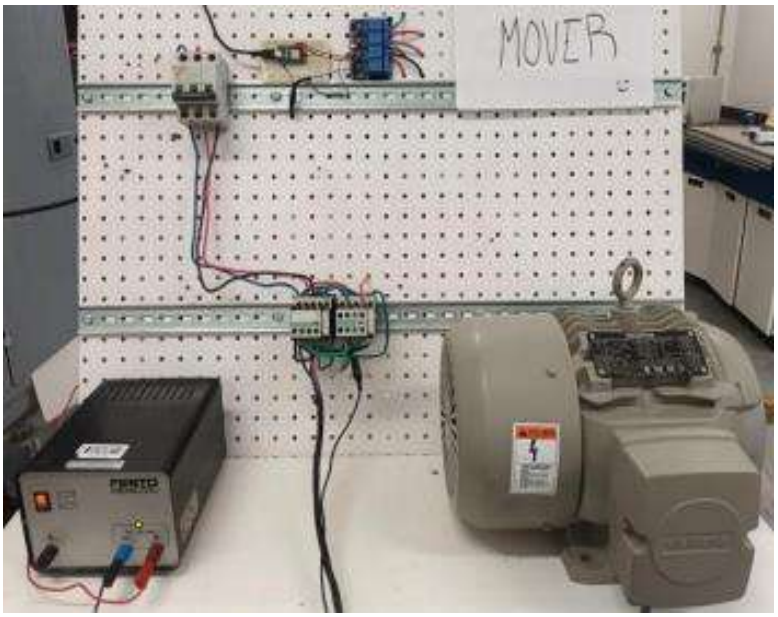


Figura 5. Configuración experimental en el laboratorio.

Para realizar la toma de datos de la velocidad de la flecha del motor se utilizó una configuración que consta de dos diodos leds; el primero emite una luz infrarroja y el segundo lo recibe. Las revoluciones son medidas mediante las interrupciones que se entre los dos leds. Las medidas de velocidades del motor fueron realizadas mediante un Arduino Mega 1.

4. Resultados

Para valorar el desempeño del control inalámbrico del giro del motor trifásico utilizando la tecnología IOT se realizaron tres experimentos. El primer experimento consta del encendido del motor con giro de la flecha hacia la derecha. En el segundo experimento se prueba el cambio de giro de la flecha del motor de lado derecho a izquierdo y viceversa. Por último, en el tercer experimento se prueba ante perturbaciones en la flecha durante su giro. En la Figura 6 se puede observar la primera prueba del control del giro a de la flecha hacia el lado derecho, los datos corresponden a la medición experimental del comportamiento de la velocidad del motor en revoluciones por minuto (RPM) a lo largo del tiempo (segundos). La velocidad del motor tarda 4 segundos en alcanzar una velocidad nominal de 3200 revoluciones por minuto, velocidad angular que se mantiene por aproximadamente 40 segundos y tarda 15 segundos en lograr el paro total de su velocidad.

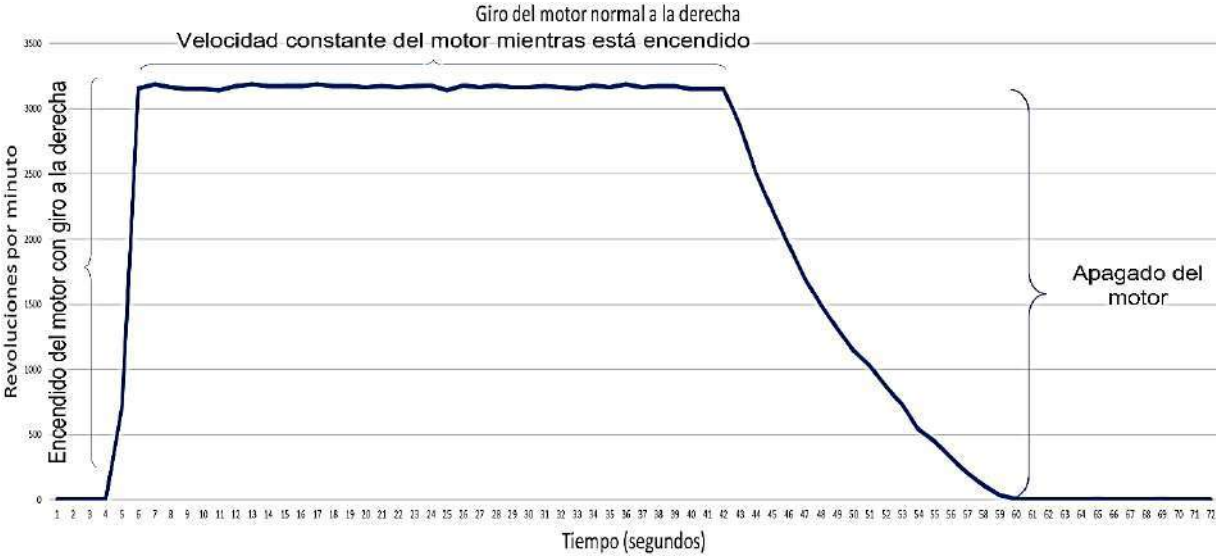


Figura 6. Grafica de encendido del motor a lado derecho a velocidad constante del motor.

Para el segundo experimento se realizó el cambio de giro del motor de derecha a izquierda y viceversa. La Figura 7 muestra el arranque del motor hacia el lado derecho durante los primeros 6 segundos con una velocidad creciente, para después lograr una velocidad constante durante 12 segundos a 3200 revoluciones por minuto hasta apagar el motor vía inalámbrica por medio de la aplicación del Particle Photon, con una caída de velocidad durante los próximos 7 segundos de manera exponencial. Durante el cambio de la velocidad hacia el lado izquierda se requieren de 8 segundos para alcanzar la velocidad nominal de 3200 revoluciones por minuto, para después dar paso al apagado total del motor hasta las 0 revoluciones por minuto con un tiempo de 16 segundos. Por último, se mantuvo la dirección el motor hacia la derecha por 18 segundos con la misma respuesta esperada de 3200 revoluciones por minuto manteniéndolas hasta ser apagado con una caída exponencial.

Por último, se probó la capacidad del control inalámbrico y de la recepción de datos mediante la tecnología IOT ante cambios inesperados e incertidumbres aplicando una perturbación mecánica en la flecha del motor. Como muestra en la Figura 8 se realizó una perturbación mecánica en la flecha del motor con un objeto metálico sólido para mostrar la capacidad de control y toma de datos de la tecnología IOT cuando existen interferencias de material en la flecha del motor garantizando su

funcionamiento y obteniendo resultados satisfactorios. En la primera etapa del experimento corresponde al giro del motor hacia el lado derecho y consta de los 3 a los 20 segundos. Los sobre picos en la gráfica son asociadas a las perturbaciones realizadas con el objeto metálico en la flecha.

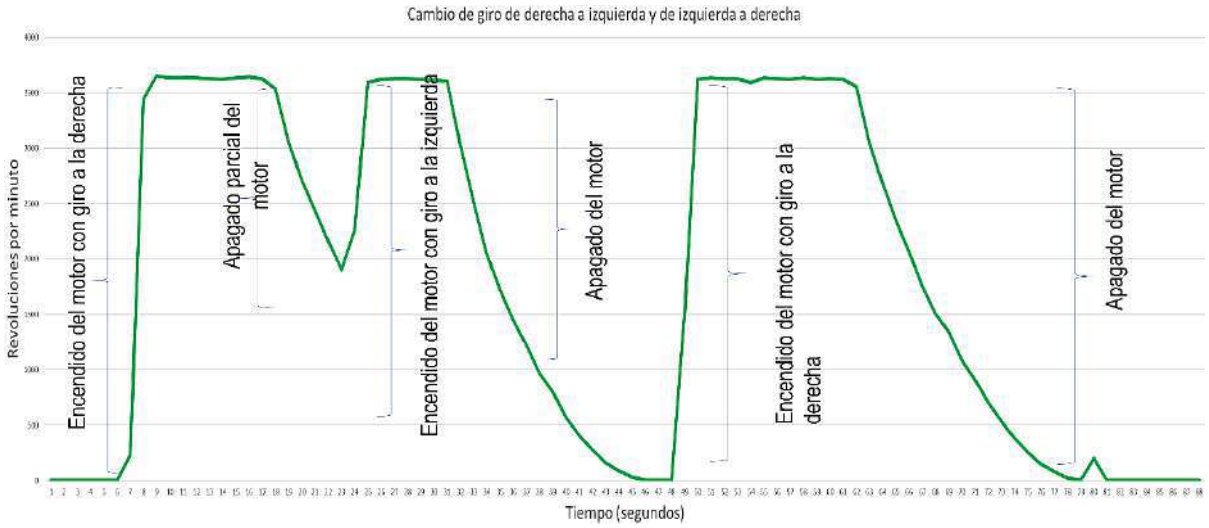


Figura. 7. Gráfica de cambio de giro de la flecha del motor de derecha a izquierda y viceversa.

Figura 8. Desempeño del motor durante perturbaciones en la flecha del motor con material metálico para probar la respuesta del control inalámbrico mediante la tecnología IOT.

En la segunda etapa del experimento, que involucra el giro del motor hacia el lado izquierdo, se observaron resultados igualmente interesantes. El proceso se inició aproximadamente a los 30 segundos y continuó hasta que el motor se detuvo por completo. En este periodo, también se registraron sobre picos notables en la gráfica, los cuales se relacionaron directamente con perturbaciones mecánicas en la flecha del motor.

Estos sobre picos en la gráfica son indicativos de la sensibilidad del sistema y su capacidad para detectar incluso las perturbaciones más pequeñas en el motor en tiempo real. Con este experimento se logra demostrar el uso de la tecnología IOT para monitorear fallas en el motor y de esta manera realizar el mantenimiento necesario en el motor trifásico para un mayor tiempo de vida útil del mismo.

5. Conclusiones

Durante este trabajo se presenta el desarrollo de una metodología para el control inalámbrico de un motor trifásico de 5 hp utilizando la plataforma de comunicación de la tecnología IOT, además de crear una interfaz de monitoreo de la velocidad angular del motor. Para lograr la implementación de la metodología propuesta en este trabajo se realizó el desarrollo del set experimental para realizar pruebas de laboratorio, así como la programación e interconexión entre el motor y el Particle Photon.

Finalmente, se llevaron a cabo tres experimentos significativos para evaluar el desempeño del control inalámbrico del motor trifásico de 5 hp mediante la tecnología IOT. En el primer experimento, se demostró la capacidad de encender el motor con la flecha girando en sentido horario. En el segundo experimento, se puso a prueba la capacidad de cambiar la dirección del giro de la flecha, tanto de derecha a izquierda como viceversa, destacando la versatilidad del sistema. En el tercer experimento, se evaluó la respuesta del motor ante perturbaciones mecánicas en la flecha durante su rotación, lo que sirve como una herramienta valiosa para monitorear posibles fallos en el motor.

En conjunto, estos resultados respaldan la viabilidad y eficacia de la tecnología IOT para el monitoreo y control de motores trifásicos de alto rendimiento, lo que tiene un gran potencial para detectar fallas tempranas y permitir un mantenimiento oportuno y adecuado, contribuyendo así a la eficiencia y la durabilidad de los sistemas industriales.

Referencias

[1] Halaholo, M. (2020). Industry 4.0, *digitization, and opportunities for sustainability*. Jornal o calender producción, 252, 119869.
[2] Ghadge, A., Er Kara, M., Marilou, H., & Goswami, M. (2020). *The impact of Industry 4.0 implementation on supply chains*. Journal of Manufacturing Technology Management, 31(4), 669-686.
[3] Bag, S., Gupta, S., & Kumar, S. (2021). *Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacture- Ing capabilities for sustainable development*. International jornal o producción económica, 231, 107844.
[4] Miskiri, W., Darwish, H., & Van Dyk, L. (2019). *An investigation of industry 4.0 skills requirements*. South Africana Jornal o Industrial Engineering, 30(3), 90-105.
[5] Diez-Olivan, A., Del Ser, J., Galar, D., & Sierra, B. (2019). *Data fusion and machine learning for industrial prognosis: Trends and perspectives towards Industry 4.0*. Información Fusión, 50, 92-111.
[6] Wang, A. Y., Mittal, A., Brooks, C., & One, S. (2019). *How data scientists use compute- tonal notebooks for real-time collaboration. Procedimos o té ACM en Human-Competer Interacción*, 3(CSCW),
[7] Pese rico, G., Morato, A., Tramaron, F., & Viteri, S. (2021). *Functional safety networks and protocols in the industrial internet of things era. Sensor*, 21(18), 6073.1-
[8] Mohammed, M. N., Al-Zubeidi, S., Bahrain, S. H. K., Zainuddin, M., & Abdullah, M. I. (2020, February). *Design and development of river cleaning robot using IOT technology. In 2020 16th IEEE International Colloquium on Signal Processing & Its Applications* (CSPA) (pp. 84-87). IEEE.
[9] Bolton, W. (2021). Instrumentation and control systems. Nenes.
[10] Gómez, J., Treesatayapun, C., & Morales, A. (2021). *Data-driven identification and control based on optic tracking feedback for robotic systems. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(5-6), 1485-1503.
[11] Gómez, J., Treesatayapun, C., & Morales, A. (2020). *Multi-inputs and multi-outputs equiva- lent model based on data driven controller for a robotic system.* IFAC-PapersOnLine, 53(2), 9784-9789.
[12] Madakam, S., Lake, V., Lake, V., & Lake, V. (2015). *Internet of Things (IOT): A literature review. Journal of Computer and Communications, 3*(05), 164.
[13] Gokhale, P., Bhat, O., & Bhat, S. (2018). Introduction to IOT. International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology, 5(1), 41-44.
[14] Sifakis, J. (2018). *System Design in the Era of IOT-Meeting the Autonomy Challenge. arrive preprint* arXiv:1806.09846.

[15] Jeong, W. S., Kim, S. H., & Min, K. S. (2013). *An analysis of the economic effects for the IOT industry. Journal of Internet Computing and Services,* 14(5), 119-128.
[16] Saleem, J., Hammoudeh, M., Raza, U., Adebisi, B., & Ande, R. (2018, June). IOT stan- dardisation: Challenges, perspectives and solution. In Proceedings of the 2nd international conference on future networks and distributed systems (pp. 1-9).1
[17] Choudhary, A., Goyal, D., Shimi, S. L., & Akula, A. (2019). *Condition monitoring and fault diagnosis of induction motors: A review. Archives of Computational Methods in Engineering*, 26, 1221-1238.
[18] Gangsar, P., & Tiwari, R. (2020). *Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A stateof-the-art review. Mechanical systems and signal processing*, 144, 106908.
[19] Balaji, S., Nathani, K., & Santhakumar, R. (2019). IOT technology, applications and chal- lenges: a contemporary survey. Wireless personal communications, 108, 363-388.
[20] Farooq, M. U., Waseem, M., Mazhar, S., Khairi, A., & Kamal, T. (2015). *A review on internet of things (IOT). International journal of computer applications,* 113(1), 1-7.
[21] Cama-Pinto, A., De-La-Hoz-Franco, E., & Cama-Pinto, D. (2012). *Las redes de sensores inala´mbricos y el internet de las cosas.*
[22] Tapia, V. (2017). Industria 4.0–Internet de las cosas. UTCiencia, 1(1), 51-60.
[23] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IOT): A vision, architectural elements, and future directions. Future generation computer systems, 29(7), 1645-1660
[24] Chen, S., Xu, H., Liu, D., Hu, B., & Wang, H. (2014). A vision of IOT: Applications, challenges, and opportunities with china perspective. IEEE Internet of Things journal, 1(4), 349-359.
[25] Hossein Motlagh, N., Mohammadrezaei, M., Hunt, J., & Zakeri, B. (2020). Internet of Things (IOT) and the energy sector. Energies, 13(2), 494.
[26] Stergiou, C., Psannis, K. E., Kim, B. G., & Gupta, B. (2018). Secure integration of IOT and cloud computing. Future Generation Computer Systems, 78, 964-975.
[27] Sanmartín Mendoza, P., Ávila Hernández K., Vilora Núñez, C., & Jabba Molinares, D. (2016). Internet de las cosas y la salud centrada en el hogar. Revista Salud Uninorte, 32(2), 337-351.
[28] Kashani, M. H., Madanipour, M., Nikravan, M., Asghari, P., & Mahdipour, E. (2021). *A systematic review of IOT in healthcare: Applications, techniques, and trends. Journal of Network and Computer Applications*, 192, 103164.
[29] Alvear-Puertas, V., Rosero-Montalvo, P., Peluffo-Ordo´n˜ez, D., & Pijal-Rojas, J. (2017). *Internet de las Cosas y Visión Artificial, Funcionamiento y Aplicaciones: Revisio´n de Literatura.* Enfoque UTE, 8, 244-256.
[30] Martínez, A. A., & Díaz, J. S. S. (2017). *Internet de las cosas y herramientas de software libre aplicadas a la educacio´n.* ingeniare, (22), 11-18.

[31] Talavera, J. M., Tobón, L. E., Gómez, J. A., Culman, M. A., Aranda, J. M., Parra, D. T., & Garreta, L. E. (2017). *Review of IOT applications in agroindustrial and environmental fields. Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 283-297.
[32] Lee, M., Hwang, J., & Yoe, H. (2013, December). *Agricultural production system based on IOT*. In 2013 IEEE 16Th international conference on computational science and engineering (pp. 833-837). IEEE.
[33] Zito, M. (2018). *La sustentabilidad de internet de las cosas. Cuadernos del Centro de Estudios en Disen˜o y Comunicacio´n.* Ensayos, (70), 1-3.
[34] Soto, J. P. T., Sua´rez, J. D. L. S. S., Rodr´ıguez, A. B., & Cainaba, G. O. R. (2019*). Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual.* La´mpsakos, (22), 86-105.
[35] Infante Moro, A., Infante Moro, J. C., & Gallardo Pe´rez, J. (2020). *Las posibilidades de empleo del Internet de las Cosas en el sector hotelero y sus necesidades formativas.* Education in the knowledge society.
[36] Sanchez Alcon, J. A., Lopez Santidrian, L., & Martínez Ortega, J. F. (2015*). Solucio´n para garantizar la privacidad en el Internet de las Cosas. El profesional de la informacio´n*, 24(1), 62-70.
[37] Escobar Gallardo, E., & Villazo´n, A. (2018*). Sistema de monitoreo energético y control domo´tico basado en tecnología internet de las cosas. Investigación & Desarrollo*, 18(1), 103-116.
[38] Jan, F., Min-Allah, N., Saeed, S., Iqbal, S. Z., & Ahmed, R. (2022). *IoT-based solutions to monitor water level, leakage, and motor control for smart water tanks. Water,* 14(3), 309.

[39] Shyamala, D., Swathi, D., Prasanna, J. L., & Ajitha, A. (2017, October). IOT platform for condition monitoring of industrial motors. In 2017 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES) (pp. 260-265). IEEE.

[40] S¸ en, Mehmet, and Basri Kul." *IoT-based wireless induction motor monitoring*." 2017 XXVI International Scientific Conference Electronics (ET). IEEE, 2017.

[41] Choudhary, A., Jamwal, S., Goyal, D., Dang, R. K., & Sehgal, S. (2020). *Condition moni- toring of induction motor using internet of things (IOT). In Recent Advances in Mechanical Engineering: Select Proceedings of NCAME* 2019 (pp. 353-365). Springer Singapore.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 6, pp. 62 – 74
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Impulsando el aprendizaje: Interfaz electrónica para simulación de sistemas automáticos

Hernández Soberón Jesús Arturo, González Medrano Miriam Zulema y Seguy Fernández Claudia Elena

Universidad Tecnológica del Norte de Coahuila
jsoberon@utnc.edu.mx

Resumen

Este artículo examina cómo las interfaces electrónicas, a través de un simulador electrónico, impulsan el aprendizaje en educación. Se enfoca en la automatización y el control de sistemas, abordando la programación como herramienta clave. Destaca la eficacia de estas interfaces para mejorar la comprensión y habilidades prácticas en áreas técnicas, promoviendo una educación más efectiva y preparando a los estudiantes para desafíos tecnológicos. Los resultados obtenidos son la interfaz prototipo la cual se aplicó en el ámbito educativo particularmente en el aprendizaje de la electrónica digital en la unidad de diseño de circuitos secuenciales utilizados para el diseño de control de un sistema automatizado. El beneficio observado fue que al alumno se le entrega el ejercicio práctico como una aplicación ejecutable, además de la interfaz la cual la pudo llevar consigo para que lo utilice en clase y en su tiempo si es el caso, terminar de resolver el ejercicio propuesto o seguir experimentando. Siendo la actividad de forma flexible, el alumno puede repetir pruebas hasta concluir con el resultado esperado. Se crea un aprendizaje autodirigido, se ahorra el tiempo que se llevaría en ensamblar en forma física el sistema propuesto, no hay riesgos, evita los accesos a recursos costosos y facilita la comprensión teórica.

Palabras clave: Automatización, Control, Educación, Programación, Simulador electrónico.

1. Introducción

Los modelos electrónicos educativos son herramientas didácticas diseñadas para facilitar la comprensión y el aprendizaje de conceptos científicos, tecnológicos, matemáticos o de ingeniería. Estos modelos utilizan componentes electrónicos, circuitos y software para simular situaciones del mundo real y permitir a los estudiantes experimentar, explorar y comprender conceptos abstractos de manera práctica.

Es así que en los últimos años ha tomado gran relevancia el concepto y aplicación del pensamiento computacional, ya que como parte de su metodología se encuentra la utilización de software de simulación como apoyo para el aprendizaje y solución de problemas, dichos paquetes informáticos permiten explorar, analizar, comprender, correlacionar y experimentar en el mundo virtual soluciones que posteriormente pueden aplicarse para resolver un problema real, como en el caso de la electrónica en el diseño y programación de circuitos, cuyos contenidos curriculares pueden ser complejos y extensos debido a la gran cantidad de desarrollos e innovaciones que han surgido en las últimas décadas. [1]

Rodríguez [2] presenta una metodología en la cual introduce una plataforma hardware de código abierto, conocida como Arduino, y basa toda la programación didáctica en prototipos realizados con la plataforma. Los adolescentes que actualmente aprenden en nuestras aulas, pertenecen a una generación que ha sustituido los libros por dispositivos electrónicos.

Diseñar una interfaz para conectar PLC (Controlador Lógico Programable), Arduino u otros circuitos eléctricos de control es esencial para crear un entorno donde estos dispositivos puedan interactuar y controlar sistemas. La propuesta a implementar es un desarrollo tecnológico propio de la Universidad adaptado a las necesidades del programa Educativo y al Plan de estudios, resultando económico para la institución.

González indicó: El desarrollo de la capacidad de análisis crítico y de aplicación del conocimiento es de fundamental importancia en la formación del estudiante de ingeniería. Es necesario incorporar nuevas metodologías que ayuden a una formación en competencias y habilidades adaptadas a los nuevos entornos tecnológicos. La inclusión de tecnología, dentro y fuera del aula, permite incorporar otros mecanismos de enseñanza y aprendizaje para complementar o potenciar la enseñanza formal tradicional [3]

El desarrollo de proyectos simulados de sistemas automáticos utilizando hardware como Processing, Arduino, Launchpad MSP430, Netduino N3 Wi-fi, Particle Photon y otros, reviste una gran importancia en el ámbito educativo. Estas simulaciones proporcionan a los estudiantes la oportunidad de aprender y experimentar de manera segura y efectiva con conceptos de automatización, electrónica y programación. Al utilizar hardware real o simulado, los estudiantes pueden comprender mejor cómo funcionan los sistemas automáticos, diseñar soluciones y depurar problemas, lo que les brinda habilidades prácticas para el mundo real. Además, estas plataformas promueven la creatividad, la resolución de problemas y la innovación, preparando a los estudiantes para enfrentar desafíos en campos como la mecatrónica, la ingeniería electrónica y la automatización industrial.

2. Interfaz electrónica para simulación de sistemas automáticos

2.1 Desarrollo del prototipo

Este trabajo se desarrolló utilizando herramientas gratuitas, como Processing, y subraya la importancia crítica de las simulaciones de sistemas automáticos en el ámbito educativo. El uso de estas herramientas permite a los estudiantes adentrarse en el mundo de la automatización y la electrónica de una manera práctica y didáctica. Las simulaciones brindan un entorno seguro y accesible para experimentar con sistemas automáticos, fomentando el aprendizaje activo y la comprensión profunda de los conceptos. Además, estas experiencias virtuales preparan a los estudiantes para enfrentar desafíos del mundo real al dotarlos de habilidades y conocimientos valiosos en un entorno de aprendizaje interactivo.

El simulador que ofrecemos ofrece una forma efectiva y segura de aprender y practicar conceptos técnicos, lo que mejora la comprensión, la retención y la aplicación de conocimientos en una variedad de sistemas automáticos, procesos de manufactura y otros escenarios que se puedan simular.

Processing es un lenguaje y un entorno de programación creado específicamente para artistas electrónicos y especialistas en diseño visual. Puede considerarse una plataforma flexible y un lenguaje perfecto para aprender a crear aplicaciones dentro del contexto de las artes visuales. [4]

Processing está basado en el lenguaje de programación Java, pero se ha simplificado y optimizado para facilitar la creación de gráficos y visualizaciones. Ofrece una serie de funciones y bibliotecas específicas que permiten a los usuarios crear rápidamente efectos visuales y animaciones en 2D y 3D. Los programas de Processing se escriben en un entorno de desarrollo específico que proporciona una vista previa en tiempo real de los resultados.

Además de su enfoque en la visualización y el arte digital, Processing también se ha utilizado en la educación para enseñar conceptos de programación y matemáticas de manera más visual e intuitiva. También se ha utilizado en la investigación científica y en la creación de instalaciones interactivas en museos y galerías.

Una característica importante de Processing es que cuenta con una interfaz simple, de manera contraria a otros entornos de desarrollo. Además, permite concentrarse exclusivamente en el conjunto de instrucciones y en la observación de resultados visuales de manera rápida. [5]

La interfaz se compone de un microcontrolador Atmega328 al cual se le carga un bootloader de Arduino y el código Firmata Estándar para realizar la comunicación de la aplicación visual hacia el microcontrolador aprovechando los puertos de comunicación I/O.

Para cargar un bootloader de Arduino en un microcontrolador ATmega328 utilizando una placa Arduino Uno como programador ICSP (In-Circuit Serial Programming). En las preferencias de Arduino IDE en la sección del "Gestor de URLs adicionales de tarjetas", se agrega la URL:https://mcudude.github.io/MiniCore/package_MCUdude_MiniCore_index.json

Dentro del "Gestor de tarjetas" se instala "MiniCore". Conectamos de acuerdo a la tabla 1 para grabar el bootloader en el microcontrolador:

Tabla 1. Conexión para grabar el bootloader en el microcontrolador.

Pin ATmega328	Pin Arduino Uno (ICSP)
Pin 1 (RESET)	Pin 10
Pin 7 (VCC)	5V
Pin 8 (GND)	GND
Pin 17 (MISO)	Pin 12 (MISO)
Pin 18 (SCK)	Pin 13 (SCK)
Pin 19 (MOSI)	Pin 11 (MOSI)

Una vez cargado el bootloader continuamos con la instalación del firmware StandardFirmata que nos permitirá controlar y comunicar con el Atmega328 a través de una conexión serial utilizando el protocolo Firmata. Esto permitirá controlar y leer entradas y salidas digitales y analógicas del microcontrolador desde Processing a través de una conexión serial.

La interfaz electrónica se complementa con el Módulo Convertidor de USB a Serial TTL CH 340, el cual se ilustra en la figura 1. Al utilizar este convertidor USB se facilita la integración de proyectos con programas de PC como Matlab, Labview, Processing y más. A nivel del programa del microcontrolador el conversor es "transparente" ya que el microcontrolador solo hace uso del clásico protocolo serial y nos olvidamos de la complejidad del protocolo USB.

Figura 1. Convertidor de USB a Serial TTL CH 340.

En la figura 2 se muestra la conexión de Atmega328 con el Módulo convertidor de USB a Serial TTL CH340.

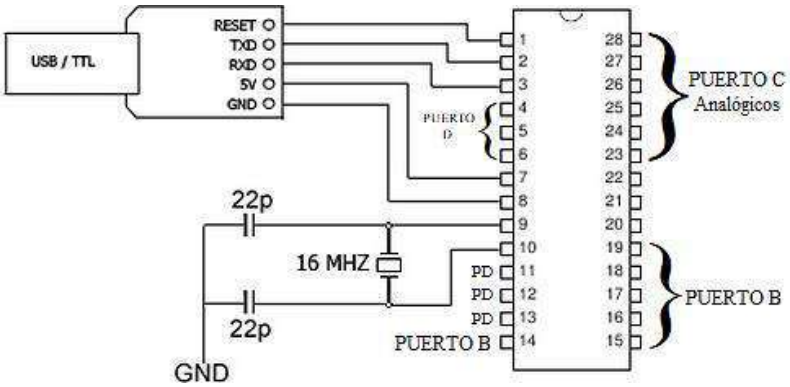


Figura 2. Conexión de Atmega con convertidor USB. Fuente: https://forum.arduino.cc/

Se carga el código Firmata Standard al Atmega328. Este es un protocolo de comunicación que permite una interacción flexible y estándar entre placas Arduino y dispositivos host, como computadoras u otros sistemas electrónicos. Facilita el control de entradas y salidas digitales y analógicas de una placa Arduino desde software externo, lo que abre un amplio rango de posibilidades para la creación de aplicaciones, automatización y desarrollo en el campo de la electrónica y la programación.

Se carga el Firmware StandardFirmata como cliente en el Atmega328. Véase la figura 3.

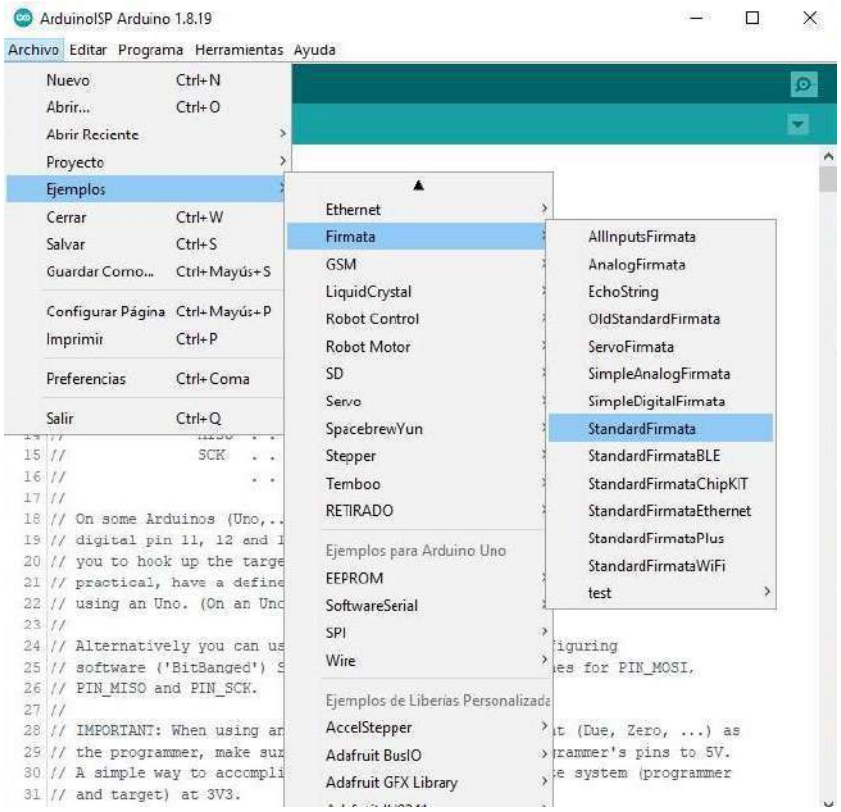


Figura 3. Selección de Firmata. *Fuente propia*

Se instala Firmata como servidor en Processing. Lo anterior se ilustra en la figura 4.

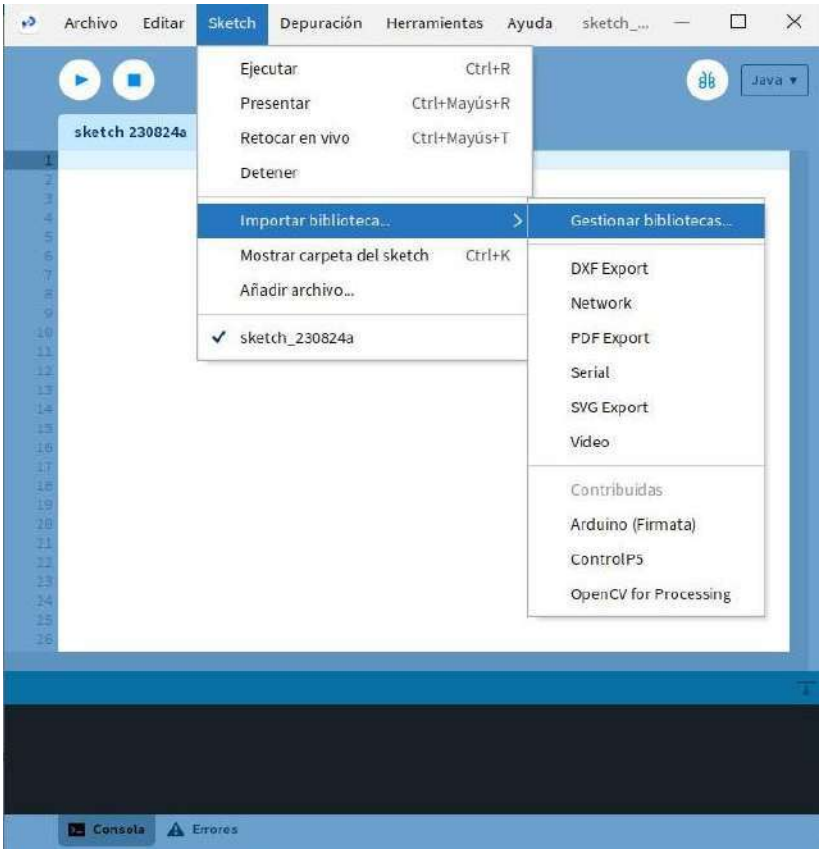


Figura 4. Instalación de Firmata en Processing. Fuente propia

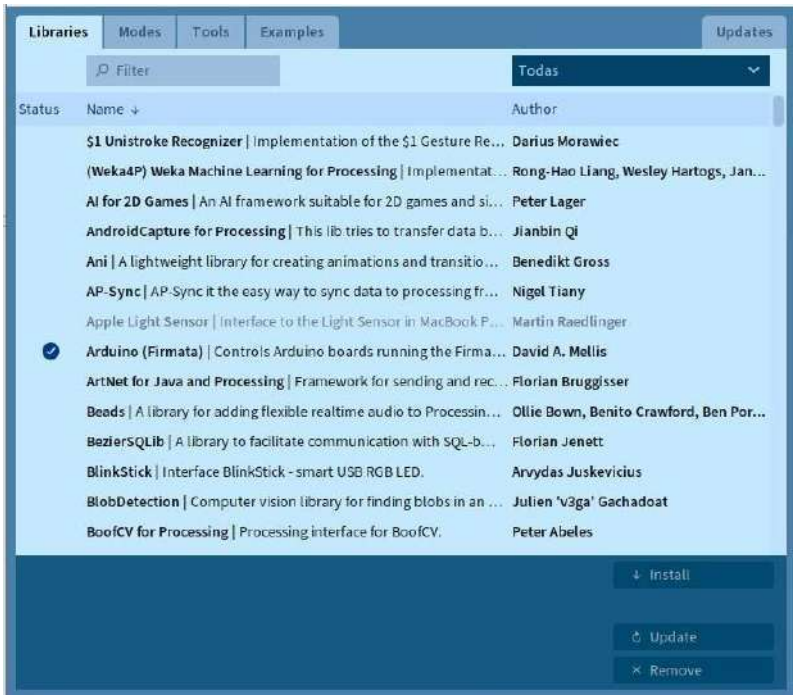


Figura 5. Instalación de librerías. Fuente propia

En la siguiente tabla se despliegan los métodos de Processing en cuatro categorías clave: bibliotecas que expanden las funcionalidades, el objeto Arduino para la interacción física, el método de control para la lógica del programa y las listas de métodos que facilitan la manipulación de datos y objetos en el entorno de desarrollo de Processing.

Tabla 2. Tabla de métodos de Processing

Las librerías a utilizar en Processing son: *import processing.serial.*;* *import cc.arduino.*;*
El objeto Arduino en Processing: *arduino = new Arduino(this, Arduino.list()[0], 57600);*
Y el método de control en Processing: *arduino.pinMode(ledPin, Arduino.OUTPUT);* *arduino.digitalWrite(ledPin, Arduino.HIGH);*

Listas de métodos en Processing:
 	
Arduino.list(); // Lista de dispositivos serie disponibles
 	
Arduino(this, dispositivo, 57600); // "dispositivo"=dispositivo de Arduino (COM1,/dev/ttyUSB1)
 	
pinMode (pin, modo); // Arduino.INPUT, Arduino.OUTPUT o Arduino.SERVO
 	
digitalRead(pin); // Devuelve Arduino.LOW o Arduino.HIGH
 	
digitalWrite(pin, valor); // valor = Arduino.LOW o Arduino.HIGH
 	
analogRead(pin); // Devuelve valor (0, 1023)
analogWrite(pin, valor); // Escribe valor PWM (0, 255)
 	
servoWrite(pin, valor); // Escribe un valor en el motor servo (0, 180)

La interfaz electrónica se comunica con el programa escrito en Processing quien mostrará la parte visual de sistemas automáticos que se conectarán con otros sistemas electrónicos de control como PLC´s, microcontroladores o circuitos electrónicos análogos o digitales como parte de una práctica. Lo anterior se muestra en la figura 6.

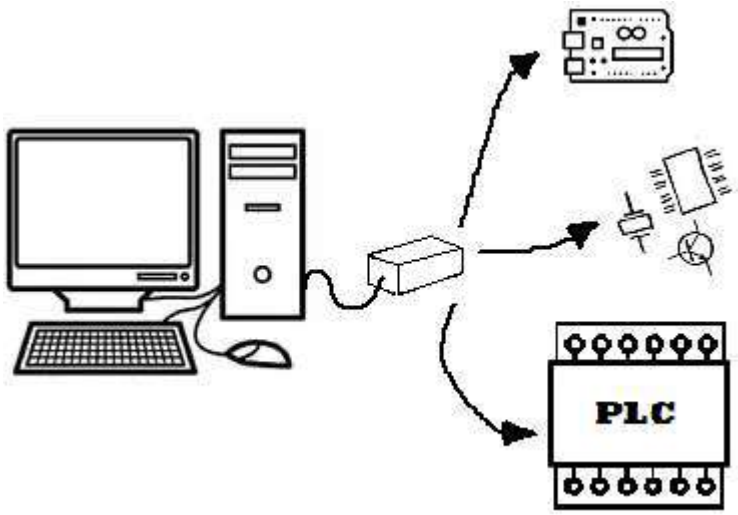


Figura 6. Comunicación de interfaz con el evento virtual. *Fuente propia*

Para la parte visual se tomó como modelo el concepto de los gemelos digitales que son las representaciones virtuales y dinámicas de objetos o sistemas del mundo real. Estos gemelos digitales desempeñan un papel crucial en la simulación, el diseño, la monitorización y la optimización de sistemas y procesos en diversas industrias, permitiendo un enfoque más eficiente y preciso en el desarrollo y la operación de sistemas complejos.

Los gemelos digitales se utilizan en una variedad de industrias y aplicaciones, como la manufactura, la ingeniería, la salud, la energía y más, este prototipo se enfoca en el área de la educación con el propósito y beneficio, que incluye la parte del “diseño y desarrollo” de sistemas de automatización para probar y simular su funcionamiento antes de que se construyan físicamente ayudando a identificar problemas potenciales, optimizar el diseño y reducir costos. Así también la parte de la “simulación y prueba” que permita simular la respuesta ante la programación de dispositivos de control como los microcontroladores, PLC´s, circuitos analógicos o digitales antes de implementarlos en un sistema real.

Como primera prueba se utilizó un ejercicio básico de automatización el cual consiste en realizar una secuencia de dos movimientos de un mecanismo sobre un riel y que cuenta con tres sensores de límite. Como ejercicio se pide desarrollar un sistema de control utilizando la tarjeta de desarrollo Arduino Uno para controlar el movimiento del mecanismo cumpliendo con los siguientes pasos:

1. Debe de contar con un botón para iniciar la secuencia.
2. Al presionar el botón, el mecanismo deberá de moverse hacia la derecha hasta llegar al sensor 3.
3. Al llegar al sensor 3, el mecanismo deberá de moverse ahora hacia la izquierda hasta llegar al sensor 2.
4. Al llegar al sensor 2, el mecanismo deberá de regresar de nuevo hacia el sensor 3
5. Al llegar al sensor 3, el mecanismo deberá de moverse hacia la izquierda hasta llegar al sensor 1.
6. Al llegar a la posición del sensor 1, el mecanismo deberá de detenerse y esperar de nuevo a que el botón de inicio sea presionado para realizar de nuevo la misma secuencia.

Figura 7. Captura de pantalla del mecanismo virtual. *Fuente propia*

Se le presenta al usuario el diagrama de conexión del escenario virtual para que pueda realizar la conexión de su sistema real a la interfaz.

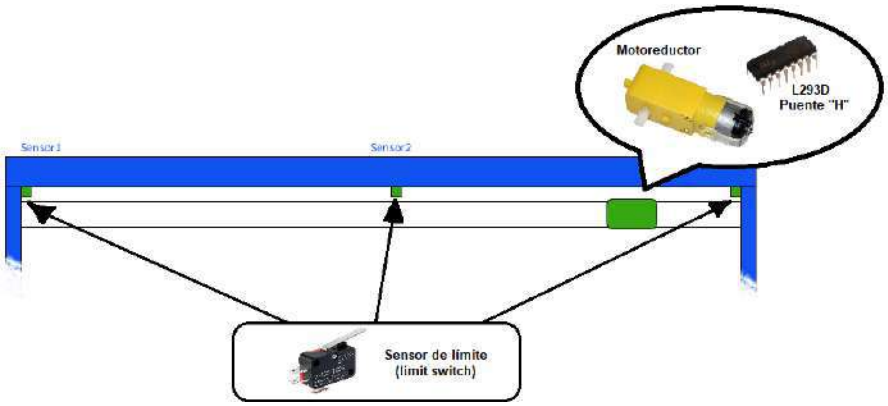


Figura 8. Muestra de dispositivos que se está simulando. *Fuente propia*

El diagrama de conexión se muestra en el Software de acuerdo al evento virtual, brindando al alumno una presentación de cómo sería la conexión eléctrica en la realidad física. Véase la figura 9.

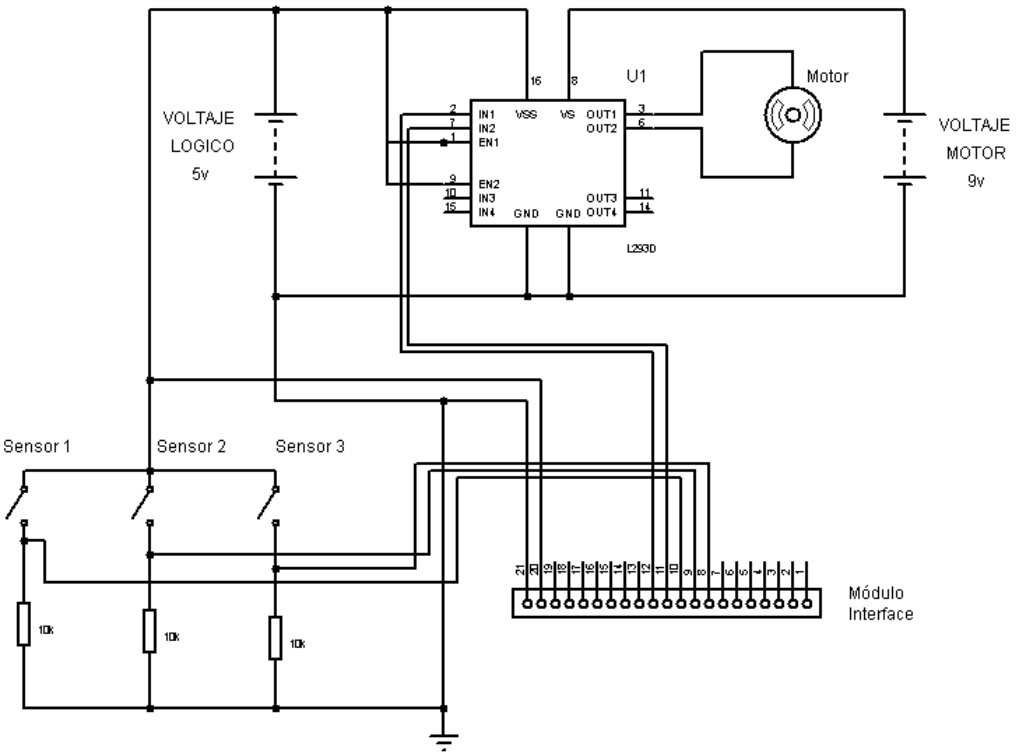


Figura 9. Diagrama de cómo se mostraría en forma real conectada a la interfaz. *Fuente propia*

En la figura 10, se muestra el Arduino Uno y se procede a su conexión con la interfaz correspondiente, proporcionando una guía visual y detallada de todo el proceso.

El uso de simuladores electrónicos ofrece una serie de beneficios significativos en el ámbito del aprendizaje. Estos beneficios son especialmente relevantes en campos como la electrónica, la ingeniería, la física y muchas otras disciplinas técnicas. Beneficios como las experiencias prácticas sin riesgos ya que los simuladores electrónicos permiten a los estudiantes experimentar y manipular componentes y circuitos sin el riesgo asociado con equipos y dispositivos reales. Algo valioso para evitar daños a equipos costosos o para evitar situaciones peligrosas en entornos de laboratorio.

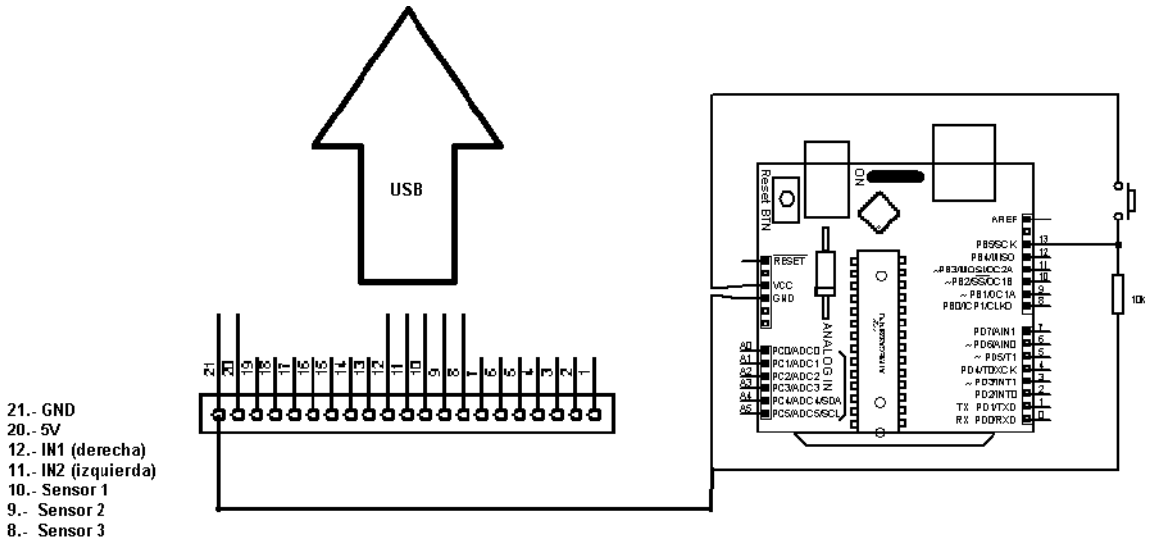


Figura 10. Ejemplo de conexión con Arduino Uno. *Fuente propia*

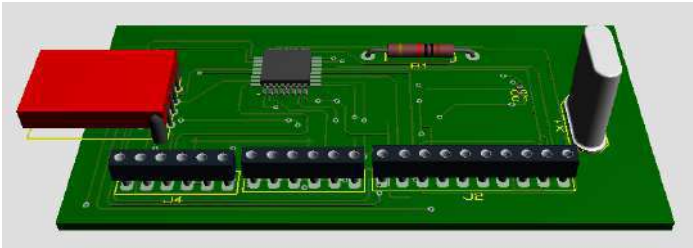


Figura 11. Propuesta de placa de circuito impreso. *Fuente propia*

Acceso a recursos de alto costo o raros, como componentes electrónicos costosos o difíciles de conseguir así como sistemas mecánicos, hidráulicos o neumáticos. Con el simulador permiten a los estudiantes trabajar con estos componentes virtuales sin incurrir en costos adicionales, solo en este caso es programar el entorno virtual con processing.

Flexibilidad y repetición, permitiendo a los estudiantes repetir un experimento y ajustar parámetros fácilmente, lo que facilita la comprensión de cómo diferentes variables afectan a los resultados. Esto fomenta un aprendizaje más profundo y una mejor comprensión de los conceptos siendo algo más que pretendemos hacer con este prototipo.

Se presenta también el aprendizaje autodirigido que permite a los estudiantes explorar y experimentar por sí mismos, lo que fomenta un enfoque más autodirigido para el aprendizaje. Pueden probar diferentes configuraciones y soluciones, lo que les da un mayor sentido de control sobre su educación y aprendizaje. Se ahorra tiempo ya que los ejercicios o prácticas reales pueden llevar tiempo en términos de configuración, recolección de datos y análisis.

Se pretende también facilitar la comprensión teórica al interactuar con estas simulaciones. Los estudiantes pueden relacionar mejor los conceptos teóricos con los resultados prácticos. Esto refuerza la comprensión global de los principios detrás de los fenómenos y procesos. Podemos además proponer el aprendizaje basado en proyectos y en resolución de problemas al enfrentarse a desafíos y problemas propuestos en el entorno virtual del simulador. Aportando a que los estudiantes desarrollen habilidades de resolución de problemas, toma de decisiones y pensamiento crítico.

3. Resultados

La interfaz queda construida con el convertidor USB a TTL y el microcontrolador Atmega328 teniendo cargado el bootloader de Arduino. Además de incluir el Firmata estándar para habilitar la comunicación entre la aplicación visual y el microcontrolador a través de los puertos de comunicación I/O. Para programar la parte visual para los entornos virtuales de automatización, se utilizó Processing 4 al cuál se le instalaron también las librerías de Firmata para Arduino. La interfaz prototipo se aplicó en el ámbito educativo particularmente en el aprendizaje de la electrónica digital en la unidad de diseño de circuitos secuenciales utilizados para el diseño de control de un sistema automatizado. El beneficio observado fue que al alumno se le entrega el programa generado por Procesing como una versión ejecutable (*Práctica1.exe*) y además de la interfaz la cual la pudo llevar consigo para que lo utilice en clase y en su tiempo si es el caso, terminar de resolver el ejercicio propuesto o seguir experimentando. Siendo la actividad de forma flexible y el alumno puede repetir pruebas hasta concluir con el resultado esperado. Se crea un aprendizaje autodirigido, se ahorra el tiempo que se llevaría en ensamblar en forma física el sistema propuesto, no hay riesgos, evita los accesos a recursos costosos y facilita la comprensión teórica.

En la figura 12 se presenta una práctica propuesta para ser ejecutada en el escenario virtual y con la interfaz propuesta:

Practica # : 14	**Nombre:** Circuito secuencial / Diagrama de Estados

Competencia:	Desarrollar y conservar sistemas automatizados y de control, utilizando tecnología adecuada, de acuerdo a normas, especificaciones técnicas y de seguridad, para mejorar y mantener los procesos productivos.
Objetivo de Aprendizaje:	El alumno desarrollará circuitos lógicos secuenciales: contadores y registros de corrimiento a través del uso de flip-flops para la implementación de contadores de eventos y de transferencia de datos binarios y el uso de las máquinas de mealy y moore.

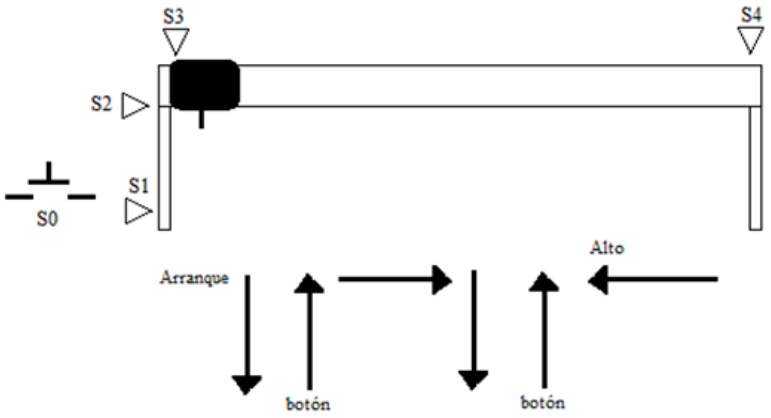
Desarrollo:	Diseñar un circuito secuencial para mover un mecanismo de izquierda a derecha. El cambio de giro se realiza con un puente "H", además cuenta con un botón de arranque, 4 interruptores de límite para detectar la posición del mecanismo y con un led. La secuencia inicia al presionar el botón de arranque y debe de cumplir con la secuencia que se muestra con flechas. Realizar el control con un microcontrolador. 

Figura 12. Práctica propuesta. ***Fuente propia***

Figura 13. Entorno virtual en Processing 4 de la práctica propuesta. ***Fuente propia***

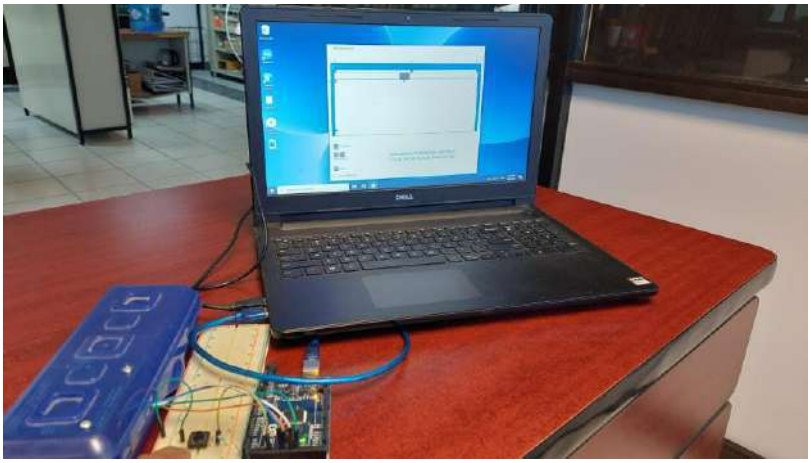


Figura 14. Entorno virtual en Processing 4 de la práctica propuesta. ***Fuente propia***

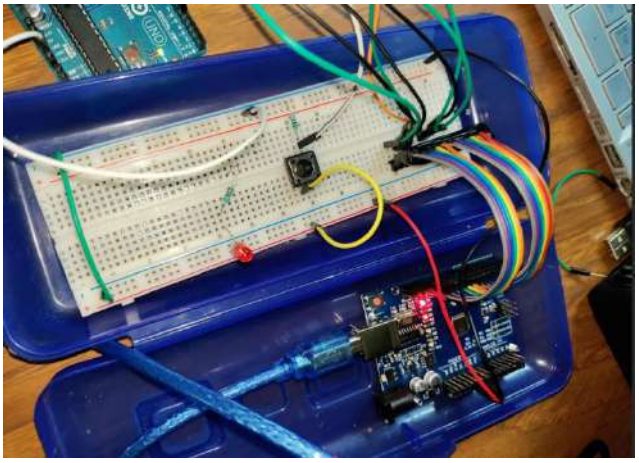


Figura 15. **Prueba de prototipo con ayuda de alumnos**. *Fuente propia*

Perspectiva futura: para mejorar la calidad de la imagen actual del prototipo se considera mejorar los detalles del entorno y dispositivos, contrastes y saturación de colores para hacer que la imagen sea

más atractiva visualmente. Realizar ajustes en la composición para centrar la atención en el sistema o imagen principal y el fondo con apariencias más limpias y profesionales. El fondo y entorno que de apariencia de un cuaderno de prácticas para no olvidar el enfoque a la educación. Con estas mejoras ayudarán a que el entorno virtual sea más impactante y cumpla de manera efectiva el propósito de esta interfaz. Véase la figura 16.

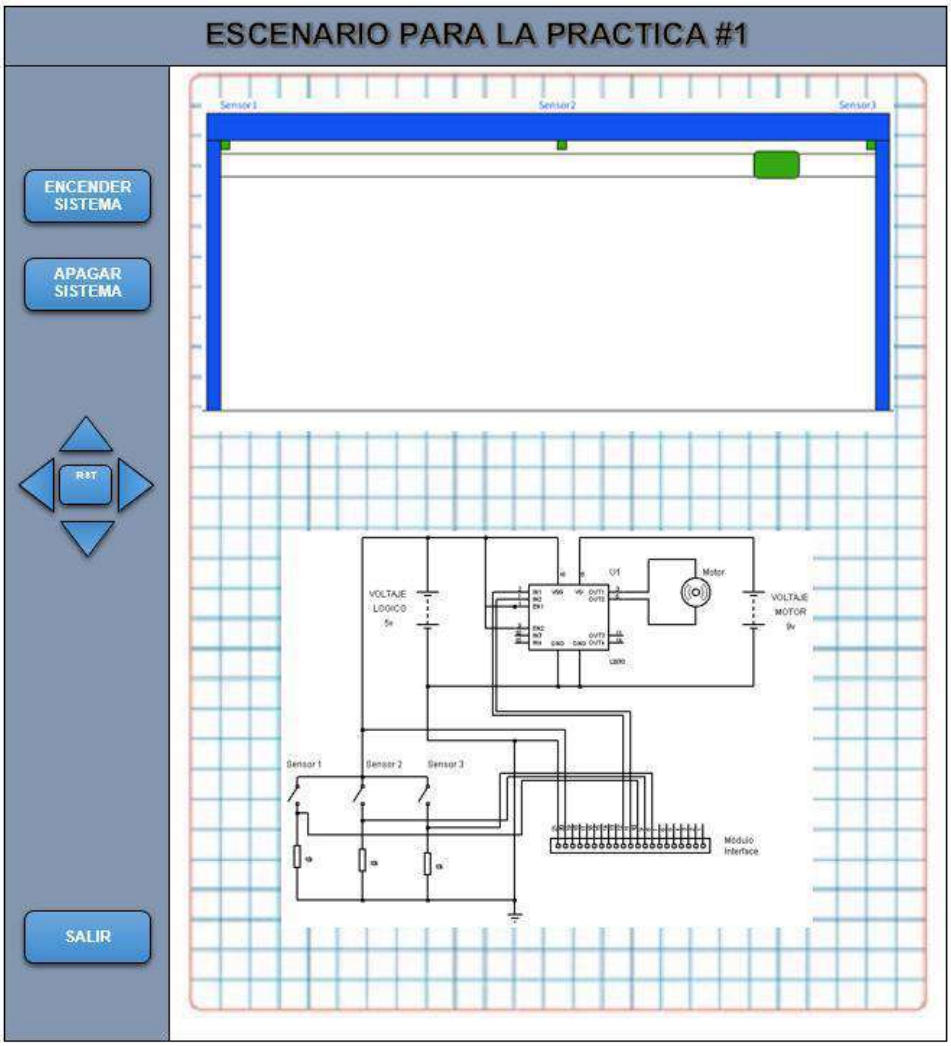


Figura 16. **Escenario para la práctica**. *Fuente propia*

4. Conclusiones

Con este prototipo propuesto, hemos logrado resolver de manera efectiva el problema de la realización de prácticas en nuestra carrera de Mecatrónica, particularmente en las materias de electrónica analógica, electrónica digital, control y PLC´s. La utilización de Processing como IDE ofrece una ventaja significativa al ser una plataforma amigable para la creación de programas con animaciones y gráficos, lo que nos permite diseñar y desarrollar prácticas adicionales para simular y controlar sistemas con dispositivos físicos. Las ventajas inherentes de los gemelos digitales son innegables, y aunque se reconoce que su implementación no siempre es sencilla, este prototipo tiene como objetivo simplificar la creación de entornos virtuales de automatización para ejercicios prácticos que los estudiantes pueden llevar a cabo. Además, su facilidad de construcción y costo económico hacen que sea una solución altamente accesible y efectiva para el aprendizaje en el campo de la Mecatrónica.

Referencias

[1] Albiter Jaimes, J., Mendoza Mendez, R.V. y Dorantes Coronado, E.J. (2019). El pensamiento computacional en la electrónica: la importancia del software de simulación en la comprensión del principio de funcionamiento de los componentes electrónicos. 3C TIC. Cuadernos de desarrollo aplicados a las TIC, 8(4), 85-113. doi: http://doi.org/10.17993/3ctic.2019.84.85-113
[2] MARTÍNEZ DÍAZ, Lina Yormary; NIÑO VEGA, Jorge Armando. Elaboración de una mano robótica didáctica para la enseñanza de programación en Arduino, dirigida al nivel de educación media en una institución educativa de la ciudad de Duitama. 2017.
[3] González, Monica Liliana, Marchueta, Julián y Vilche, Ernesto Adrián. Modelo de aprendizaje experiencial de Kolb aplicado a laboratorios virtuales en Ingeniería en Electrónica . s.l. : Jornadas Nacionales de TIC e Innovación en el Aula, 2011.
[4] Team, Processing. FILEHIPPO Software That Matters. [En línea] https://www.processing.org.
[5] Hola Mundo con Processing. Abascal Mena, Maria Del Rocio, Ornelas, Lopez y De Jesús, Erick. 2015, pág. 91.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 7, pp. 75 – 86
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Diseño de un robot móvil teleoperado para la fumigación de cultivos

Mirelez Delgado Flabio Darío[1], Hernández González Umanel Azazael[1], Álvarez Montufar Jesus[1], Caldera Sánchez Marcos Eduardo[1], Domínguez Sánchez Sergio[1] y Moreno Castro Addried Samir[1].

[1] Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisiplinaria de Ingeniería Zacatecas., Zacatecas, México.
uahernadez@ipn.mx

Resumen

En el presente trabajo se diseñó un robot móvil teleoperado siguiendo la metodología de diseño mecatrónico, este prototipo está pensado para la fumigación de cultivos en la región de Jerez, Zacatecas. El robot tendrá la función principal de cubrir la actividad de fumigación realizada por el humano y así, evitar que los agricultores tengan un contacto cercano y directo con los pesticidas, con el fin de reducir los niveles de riesgo en cuanto a la percepción de enfermedades que éstos ocasionan. El robot contará con un sistema de locomoción que permitirá desplazarse sobre las superficies irregulares de los terrenos en la zona de cultivo y podrá ser manipulado por un operador a una distancia segura, por medio de un control inalámbrico por radiofrecuencia, lo que permite aprovechar el conocimiento y la experiencia del operador, al mismo tiempo que reduce los riesgos a la exposición directa de los pesticidas. Además, el diseño del robot se centrará en la movilidad y maniobrabilidad garantizando su capacidad para desplazarse de manera eficiente a través de los campos de cultivo.

Palabras clave: Agricultor, Fumigación, Robot móvil, Teleoperado, diseño mecatrónico.

1. Introducción

La población mundial está aumentando y, por lo tanto, es necesario aumentar el suministro de alimentos. Según [1], la producción agrícola, especialmente la agricultura [2], debe aumentar en un 70% en 2050, cuando se espera que la población mundial supere los 9 mil millones. Al mismo tiempo, el aumento de las actividades agrícolas provoca el desperdicio y la extracción de agua de riego, fertilizantes y otros productos fitosanitarios, lo que amenaza la sostenibilidad ambiental y las ganancias de los agricultores [3].

Debido al crecimiento de la producción agrícola el uso de plaguicidas ha aumentado significativamente debido a dos factores: el primero, para combatir plagas como hongos, insectos, malezas, ácaros, bacterias, nematodos y roedores, entre otras formas de vida animal o vegetal, indeseables o que pueden dañar a agricultura y enfermedades que afectan el campo y la segunda para hacer más atractivo el “producto final”, ya que no tuvo problemas de plagas y enfermedades en su desarrollo [4]. Según la AGROASEMEX [5] las plagas pueden producir pérdidas de hasta un 40% de la producción agrícola mundial. No solo reducen la producción agrícola, sino que también desmejoran la calidad de los cultivos, lo cual supone grandes repercusiones sobre el sector rural. Entre las plagas más nocivas para los agricultores se encuentran: el pulgón amarillo, la mosquita blanca, el picudo rojo, la araña roja, el escarabajo gallina ciega, la mosca de la fruta y la larva minadora de hojas.

Las tareas de fumigación suponen un alto riesgo para la salud de los agricultores. Las actividades que causan más preocupación son: la mezcla y la aplicación de los pesticidas. Las principales vías por

las que ingresan al cuerpo humano son: a través de la piel (dérmica), por medio de la respiración (exposición por inhalación) y llevando pesticidas a la boca (oral). Estas actividades han provocado una serie de intoxicaciones accidentales, e incluso el uso rutinario de pesticidas pueden generar riesgos para la salud de las personas tanto a corto como a largo plazo [4,6].

La agricultura automatizada y la robótica agrícola son conceptos que prometen cambiar la forma en que las sociedades se aprovisionan de alimentos gastando menos en recursos, con una mínima manipulación y menos actividades pesadas inherentes al trabajo convencional del campo. Un robot agrícola es uno que está diseñado para ocupar una actividad específica dentro del sector agrícola. Los robots agrícolas fueron concebidos para la automatización de las tareas manuales, repetitivas y pesadas del campo. Este tipo de máquinas suelen ser eficientes, disminuyendo los costos de producción [7]. El robot XAG R150 es un vehículo terrestre no tripulado que ofrece diferentes configuraciones, puede ser utilizado para trabajos de fumigación o para transporte de carga. Es un robot fácil y sencillo de usar con su control remoto que se maneja a una sola mano y viene configurado para realizar operaciones autónomas, cuenta con un tanque de fumigación con capacidad de 100 litros con 12 metros de ancho de pulverización. Tiene un chasis de altura regulable que le permite pasar por encima de los cultivos sin dañarlos. Este vehículo tiene tracción en las 4 ruedas con una capacidad de avanzar a una velocidad de 1.2 metros por segundo. Su precio es de 24,900 euros. El pulverizador Terran es un robot autónomo equipado con un sistema de pulverización selectiva que sirve para aplicarse en barbechos o en cultivos de hasta 70 cm. Contiene una motorización hibrida por parte de baterías y un motor a combustión diésel obteniendo una potencia adecuada tanto para la transmisión de las ruedas como la pulverización. Contiene un tanque con una capacidad de 600 litros y una autonomía de trabajo de 8 horas continuas.

Por lo que se presenta el diseño de un robot móvil terrestre teleoperado que realizará la fumigación de insecticida (dimetoato) hasta una altura de 2.5 metros, en cultivos como durazno, ciruela, manzano, chabacano y árboles frutales con la menor intervención humana para el control de plagas, enfermedades y malezas, así como ayudar a prevenir daños en la salud de los trabajadores encargados de realizar esta tarea.

2. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo se diseñó un robot móvil terrestre teleoperado para la fumigación de cultivos, contará con un chasis con medidas de 1 metro de ancho por 1.2 metros de largo y 1 metro de alto, el cual permitirá montar los elementos necesarios para realizar la tarea de fumigación en cultivos con una altura de hasta 2.5 metros. Contará con un sistema de locomoción por ruedas capaz de desplazarse sobre la zona de los terrenos de cultivos. Se implementará un sistema de almacenamiento con un tanque de 20 litros y un sistema de pulverización por medio de una bomba, mangueras y boquillas pulverizadoras para esparcir de manera uniforme el insecticida a una altura de hasta 2.5 metros. El robot será controlado de manera inalámbrica por medio de un control remoto, el cual permitirá controlar los movimientos del robot, así como activar y desactivar el sistema de pulverización dentro de una distancia máxima de 100 metros.

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 robot móvil teleoperado para la fumigación de cultivos como se muestra en la Figura 1. El diseño de los diagramas se realizó en Edraw Max online versión gratuita.

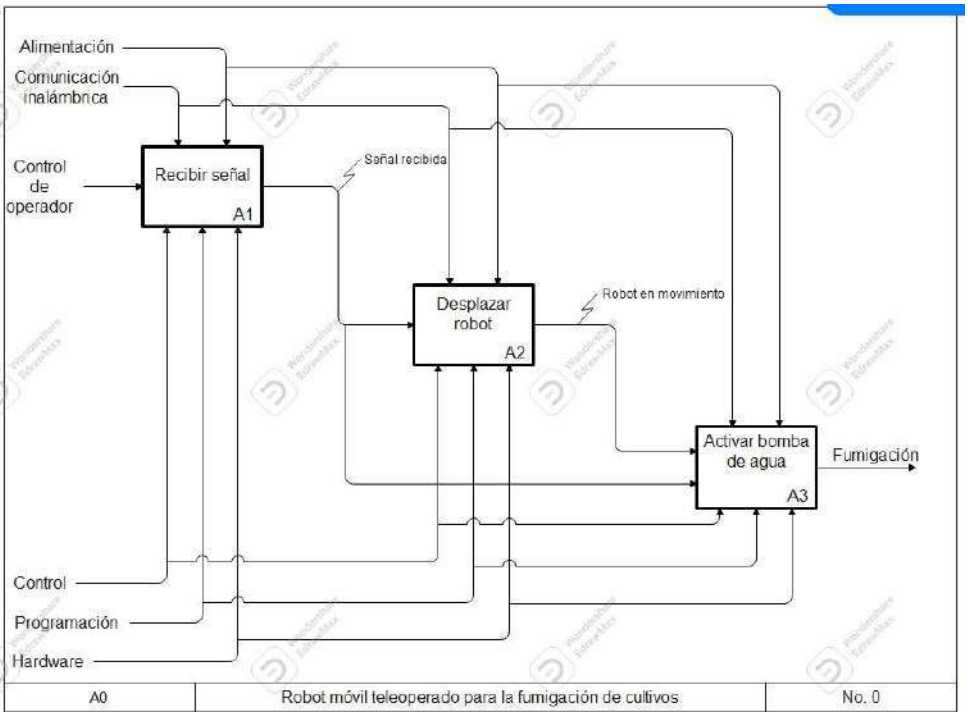


Figura 1. Diagrama A0. Proceso de selección e identificación del robot móvil teleoperado para la fumigación de cultivos.

Una vez definido el funcionamiento del sistema se procedió a determinar las necesidades principales a cubrir, las cuales se muestran en la Tabla 1. Se enumeran las necesidades del robot, desde 1 a 4 sus niveles de importancia, siendo 1 el más alto y 4 el nivel más bajo.

Tabla 1. Necesidades del sistema.

No.	Necesidad	Importancia
1	Manejo intuitivo	2
2	Sistema de locomoción que permita desplazarse en terreno irregular	1
3	Estructura capaz de soportar el tanque de almacenamiento	1
4	Comunicación inalámbrica estable	2
5	Seguro para el operador	3
6	Sistema de aspersión hasta 2.5 m de altura	2
7	Accesible para mantenimiento y limpieza	3
8	Buena presentación	4
9	Buena velocidad de desplazamiento	3
10	Mantener estabilidad en el desplazamiento	2
11	Almacenamiento de energía para una buena autonomía	2

2.2 Diseño Detallado

En la Figura 2 se muestra el diseño CAD realizado del robot donde está incluido el sistema de locomoción compuesto por dos brazos trapezoidales, ruedas y motores, estos dos brazos estarán unidos mediante un mecanismo diferencial de barras para estar compensando sus movimientos mientras se va desplazando por el terreno de los cultivos. El cuerpo principal del robot es donde se encuentra el tanque de almacenamiento, la bomba de agua, la batería y la caja para los circuitos electrónicos, por otro lado, se cuenta con extensiones para que el sistema pulverizador alcancé los 2.5 metros de altura. Este vehículo tiene tracción en las 4 ruedas de un diámetro de 20 cm lo que permite mover el robot en terreno agrícola.

Figura 2. Diseño CAD del robot.

Para el diseño mecánico del robot, se dividió en 3 partes fundamentales; el cuerpo principal del robot, el sistema de locomoción y un mecanismo diferencial de barras. El cuerpo principal del robot (figura 3) es la estructura donde se encontrará un tanque de almacenamiento de 20 litros, la parte del circuito eléctrico, la bomba de agua, la batería que alimentará dichos componentes y motores y las extensiones para realizar la fumigación hasta una altura de 2.5 metros. Esta parte del robot será fabricada por un perfil cuadrado de acero AISI 1020 con medidas de 20x20 mm unidos mediante soldadura. Esta estructura será recubierta por placas de aluminio 1060 con el fin de proteger los componentes y reducir el peso de la estructura. La parte de arriba será atornillada para poder retirarla y que permita realizar el mantenimiento de los componentes, así como rellenar el tanque de almacenamiento, mientras que en los costados y la parte trasera será fijada por medio de pijas a la estructura tubular. En la parte inferior se soldará un tramo de perfil cuadrado del mismo material con medidas de 40x40 mm donde tendrá un eje el cual sentará en el sistema de locomoción.

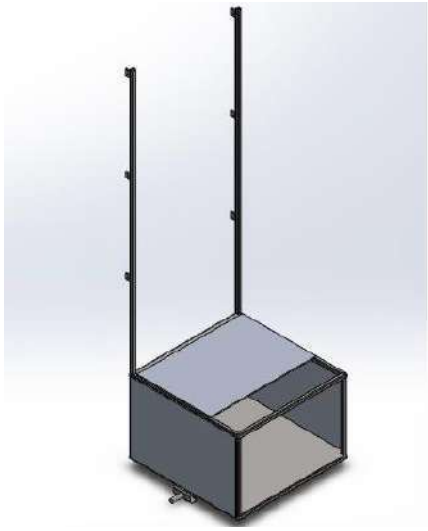


Figura 3. Cuerpo principal de la estructura robot.

El sistema de locomoción está constituido por dos brazos en forma de trapecio (Figura 4) fabricados con un perfil cuadrado de acero AISI 1020, con medidas de 40x40 mm unidos mediante

soldadura. En los extremos de los brazos contará con una placa del mismo material para colocar los soportes de los motorreductores. En el perfil superior horizontal se tendrá un agujero donde se colocará un rodamiento para introducir el eje del cuerpo principal y los brazos puedan pivotear para recorrer superficies irregulares.

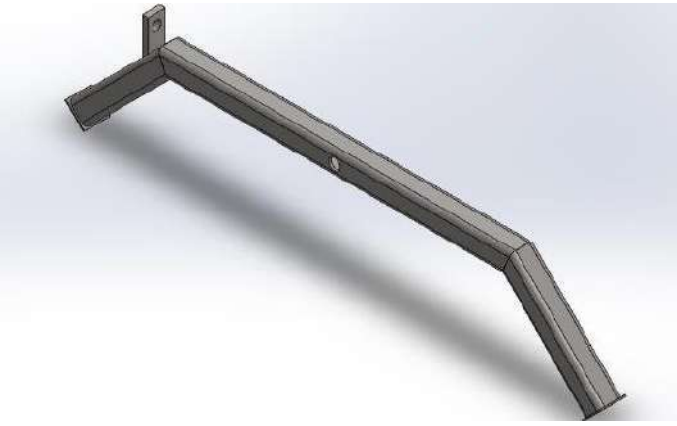


Figura 4. Brazo trapezoidal.

El mecanismo diferencial de barras (figura 5) estará constituido por medio de una barra diferencial, bielas, rodamientos y puntos de pivote. La barra diferencial contará con un eje en el centro de ésta el cual estará unido a la estructura del cuerpo principal del robot mediante un buje que permitirá el pivoteo de la misma. Las bielas conectarán la barra diferencial con los brazos trapezoidales por medio de tornillos con el sistema de locomoción para compensar los movimientos que hagan cada uno de éstos al desplazarse en la superficie irregular.

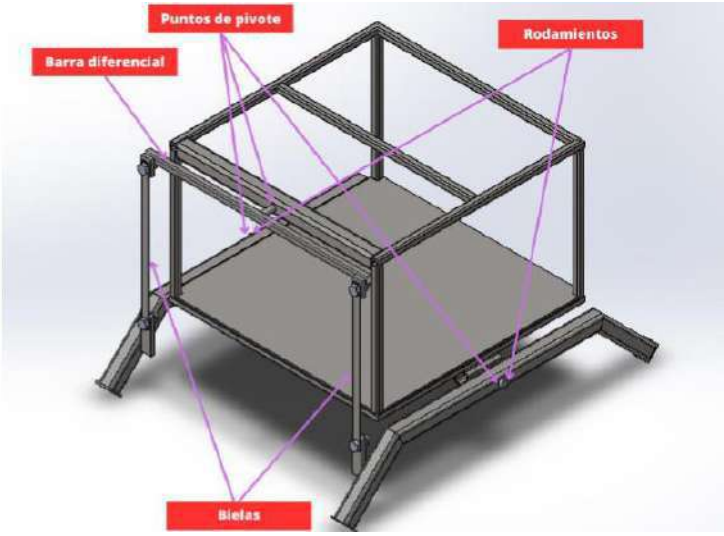
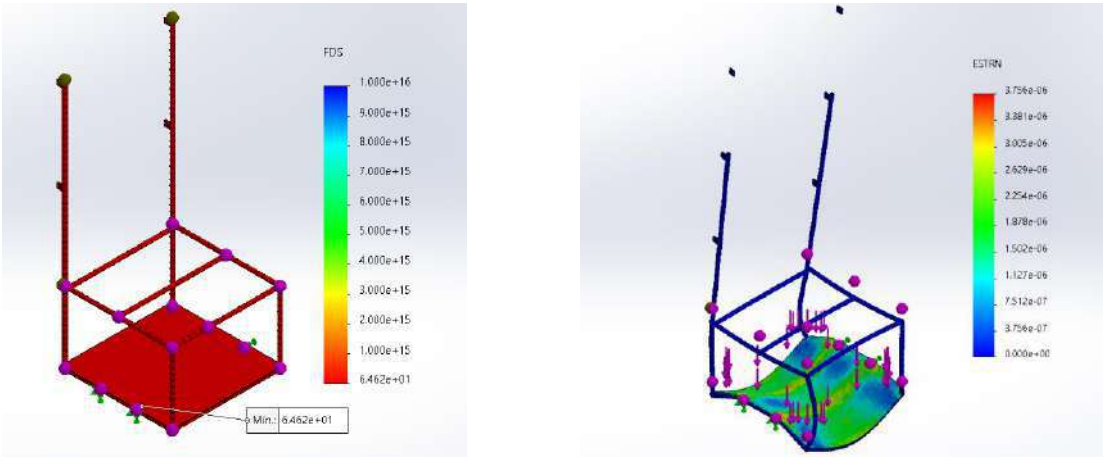


Figura 5. Mecanismo diferencia de barras.

Se realizó un análisis estático a las partes que principalmente estarán sometidas a cargas las cuales son: cuerpo principal de la estructura del robot y el brazo trapezoidal encargado del sistema de locomoción. Para el análisis en esta parte se le aplicó una fuerza repartida de 343 N distribuida sobre la placa donde se encontrará el tanque de almacenamiento, el circuito eléctrico, la batería de alimentación y la bomba de agua. En la figura 6(a) se observa que el estudio arroja un factor de seguridad mínimo de 64.62, el cual indica que la estructura es capaz de soportar la carga a la que estará sometida. En la figura 6(b) se presentan los resultados de las deformaciones unitarias al momento de que se le aplique la fuerza distribuida de los componentes que se encontrarán en la estructura principal.

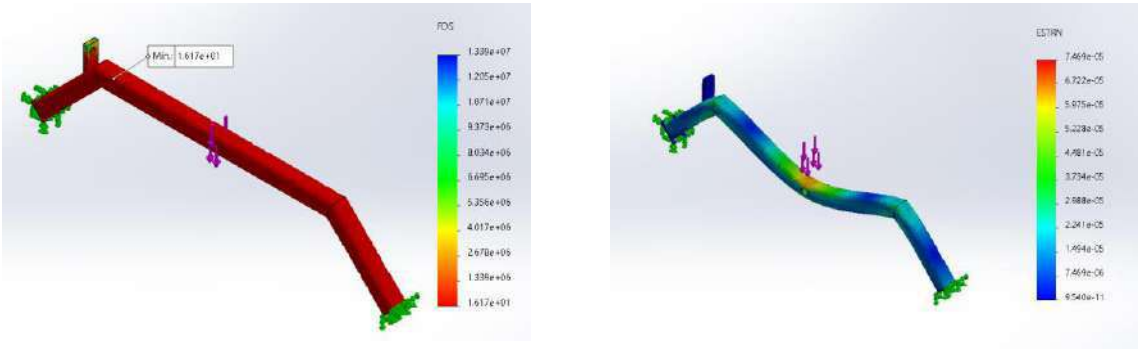
Se observa que el cuerpo principal del robot tiene una deformación mínima por lo que es totalmente despreciable.



(a) Factor de seguridad. (b) Deformaciones Unitarias

Figura 6. Estudio estático del cuerpo principal de la estructura del robot.

Para el estudio de este elemento se tomó la mitad de la carga total de la estructura (434.826 N) ya que estará distribuida en los dos brazos trapezoidales del sistema de locomoción. En la figura 7(a) se observa que el estudio da como resultado un factor de seguridad mínimo de 16.17, que indica que el brazo trapezoidal es capaz de soportar el peso de la estructura total y sus componentes. En la figura 7(b) se muestra el resultado de la deformación unitaria en el brazo trapezoidal al momento en que se le aplique la mitad de la carga total de la estructura, se puede observar que la deformación máxima es un valor muy bajo por lo que es totalmente despreciable y no afectará su estructura.



(a) Factor de seguridad. (b) Deformaciones Unitarias

Figura 7. Estudio estático del brazo trapezoidal del robot.

Para la selección de los motores se calcula el par que deben de tener para superar la fuerza que se opone al movimiento del robot. Tomando en cuenta una pendiente máxima de 5°, un diámetro de ruedas de 20 cm, el peso del robot de 88.74 kg, el material de las llantas que son de caucho y circulan en tierra, además de la resistencia a la rodadura. En la figura 8 se muestra el diagrama de cuerpo libre del robot a rodar en una superficie con 5° de inclinación. Se realiza un análisis sobre las fuerzas que actúan sobre el prototipo, primeramente, calculando la fuerza normal con (1).

$$Wn = m * g * \cos(5°) \quad (1)$$

$$Wn = (88.74kg)(9.81m/s2) * \cos(5°) = 866.34N$$

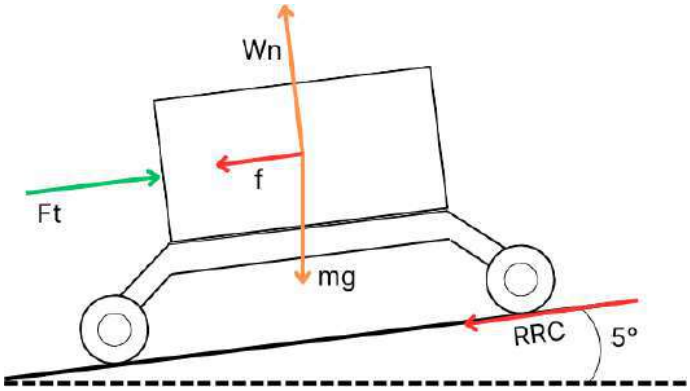


Figura 8. Diagrama de cuerpo libre.

Después, se calcula la fuerza que se opone al movimiento según su peso y la inclinación del terreno con (2).

$$f=m*g*sen(5) \tag{2}$$
$$f=(88.74kg)(9.81m/s2)*\text{sen}(5°)=75.8N$$

La fuerza total que se necesita para desplazar el prototipo se calcula con (3) donde el RRC (coeficiente de resistencia a la rodadura) sobre tierra labrada es de 0.10 a 0.20 según el artículo [8], el cual se considera de 0.15 y sustituyendo los valores obtenidos anteriormente se tiene que:

$$Ft=RRC*Wn+f \tag{3}$$

$$Ft=(0.15)(866.34N)+75.8N=205.751N$$

La potencia requerida para mover el robot se calcula a partir de (4).

$$P_t = \frac{F_t * d}{t} = F_t * v_t \tag{4}$$

Donde vt es la velocidad tangencial de las ruedas, o sea la velocidad a la que se va a desplazar el robot, donde se tiene como métrica de diseño una velocidad de 0.4 m/s.

$$Pt=(205.751N)(0.4m/s)=82.34W$$

La potencia obtenida se distribuirá de manera uniforme en las 4 llantas, por lo que la potencia necesaria de cada motor sería de:

$$P_{motor} = \frac{82.3\ W}{4} = 20.375\ W$$

Para calcular el par de un motor de CD se utiliza 5.

$$T_{motor} = \frac{P_{motor}}{\omega} \tag{5}$$

$$Tmotor=5.143Nm=52.44kgf*cm$$

Para el sistema eléctrico/electrónico del robot se proponen algunos elementos como:

- Microcontrolador. ATMega 2560.
- Sensores. Sensor flotador universal.
- Actuadores: Motorreductor CD de 12V, bomba de diafragma de CD de 12v
- Controladores. Controlador BTS7960
- Comunicación: XBee PRO.
- Sistema de riego. Boquilla de cobre ajustable, deposito de 20 litros de almacenamiento, manguera “micro-tubing” de PVC

Para la selección de la batería se requiere conocer la potencia que utiliza cada componente que se usará en el circuito electrónico del robot, y así calcular la capacidad requerida de la batería para que el robot funcione aproximadamente 1 hora. En la Tabla 2 se muestra la potencia consumida por los componentes.

Tabla 2. Potencia total consumida.

Componente	Voltaje nominal(V)	Corriente nominal(mA)	Cantidad	Potencia(mW)
Controlador y motor	12	2000	4	96000
Arduino	5	50	1	250
XBee	3.3	55	1	181.5
Controlador y bomba	12	5000	1	60000
		Total		156431.5

Tomando los resultados en la Tabla 2, se tiene que el consumo total de la potencia de los componentes es de 156.4315 Watts. Considerando que el voltaje requerido es de 12 V, por lo que la corriente que necesita la batería para trabajar durante una hora es de C = 13.036 Ah.

El resultado C, es la capacidad que requiere la batería para que el robot funcione por una hora si ésta se descarga al 100%. Es recomendable trabajar hasta que la batería tenga un 20% de carga, esto con el fin de evitar daños y extender la vida de la batería y obtener la mayor cantidad de ciclos de carga y descarga que ésta puede ofrecer se obtiene C' = 16.295 Ah.

La capacidad de la batería requerida es de mínimo 16.295 Ah a 12 V, pero se desea garantizar una mayor autonomía para el robot, por lo cual se va a utilizar una batería de 24 Ah. La batería seleccionada es una batería Steren recargable sellada de ácido-plomo, de 12 V, 24 Ah y hasta 1000 ciclos de carga/descarga.

Ya que algunos componentes seleccionados funcionan a un voltaje inferior a 12 V, se necesita de un regulador de voltaje para reducir el voltaje de la batería al voltaje requerido por dichos componentes; se seleccionó el regulador de voltaje LM2596.

Una vez seleccionados los componentes electrónicos, se realizó el diseño del circuito electrónico (figura 9) encargado recibir las instrucciones para realizar los movimientos del robot y accionar la bomba de agua. Cuando se reciban las instrucciones enviadas por el operador por medio del sistema de comunicación inalámbrica, el Arduino las ejecutará y pondrá en movimiento el robot. En la figura 9 se emplean unos motores genéricos para representar la conexión de los mismos.

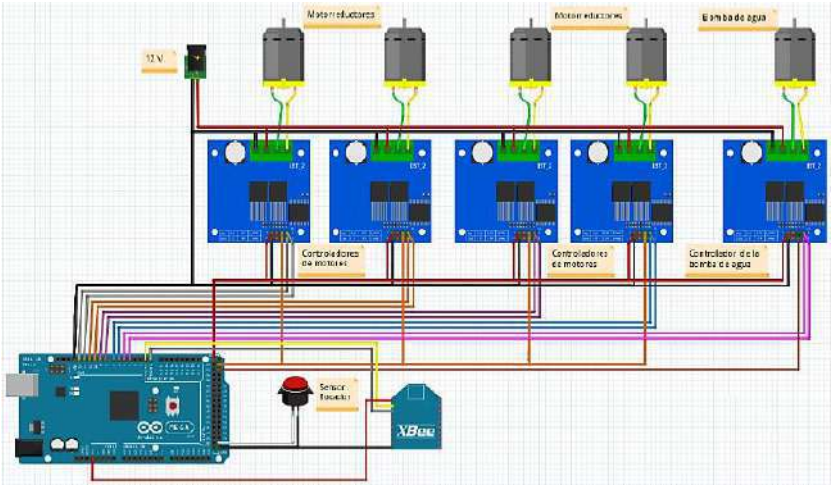


Figura 9. Diagrama de conexión del circuito electrónico del robot.

Para la interfaz se va a diseñar un mando con el microcontrolador Arduino nano, un joystick, una alarma por medio de un led que avise cuando se vacíe el tanque de almacenamiento y un interruptor para activar y desactivar la bomba de agua. Para el envío de las instrucciones se utilizará el módulo XBee. En la figura 10 se muestra su diagrama electrónico.

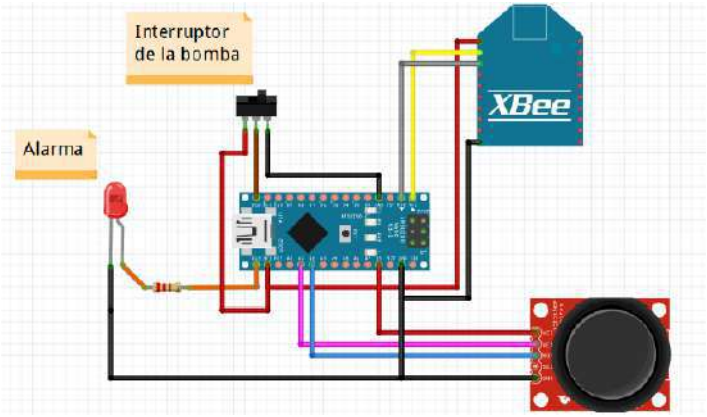


Figura 10. Diagrama de conexión del circuito electrónico del mando del robot.

En la figura 11 se muestra un boceto del diseño del mando controlador, el cual está constituido por el joystick, el switch interruptor de la bomba, la alarma led, el Arduino nano y el módulo de conexión inalámbrica XBee.

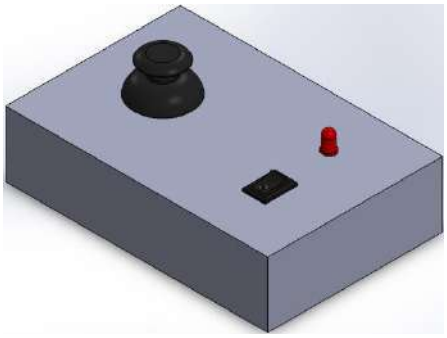


Figura 11. Boceto del mando controlador.

Se realizó un diagrama de flujo (figura 12) donde se muestra el proceso que realizará el robot para ejecutar su funcionamiento y cumplir el objetivo que es la fumigación. Este diagrama será una herramienta para realizar la programación y se realizó en Edraw Max Online.

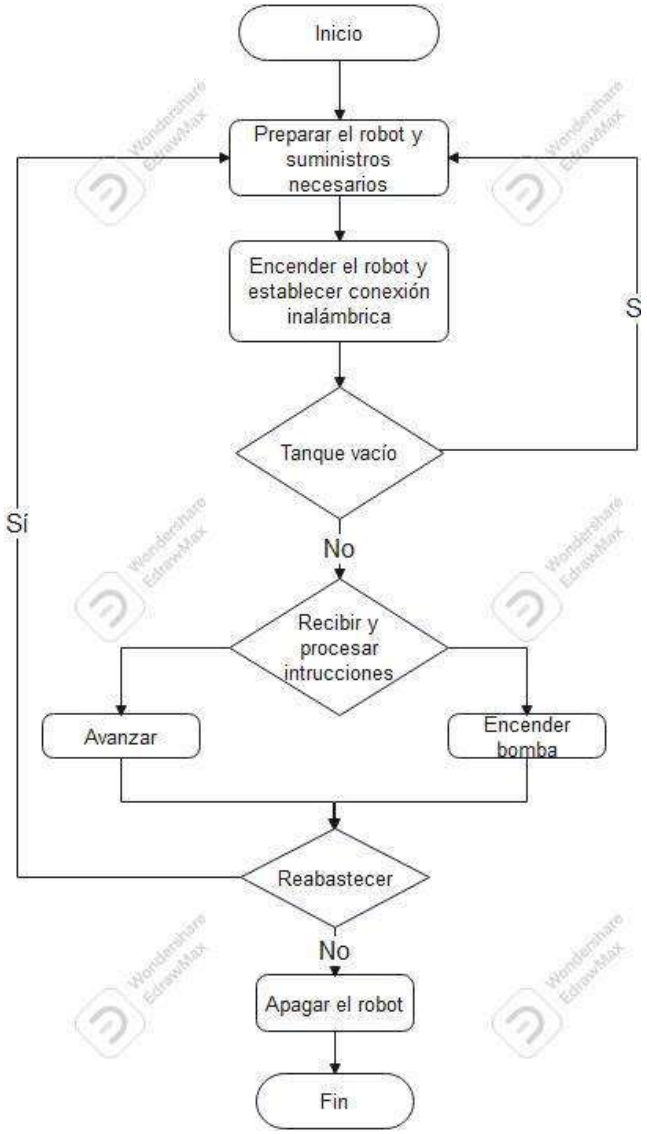


Figura 12. Diagrama de flujo.

3. Resultados

Basado en el enfoque de diseño mecatrónico, se logró el diseño de prototipo completo integrando varios mecanismos en la estructura del robot definido de acuerdo con los requisitos establecidos. Se siguieron los siguientes pasos para llegar al diseño final del prototipo:

- Se generó un diseño que cumplieran con los objetivos especificados y la lista de requerimientos establecida

- Se diseñó una estructura del robot para poder incorporar los componentes mecánicos y electrónicos.

- Se seleccionaron los materiales que mejor se adapten a las necesidades del sistema.

- Para el mecanismo, se diseñó una estructura que permite guardar todos los elementos electrónicos del robot, asi como el sistema de fumigación. Este mecanismo se analizó con herramientas CAD para poder comprobar que funcionará en el campo.

- Se seleccionó y diseñó un mecanismo que pueda circular por los terrenos del campo sin que tenga problemas respaldado en cálculos y simulaciones en distintos softwares para comprobar las suposiciones hechas, tales como: análisis estáticos para comprobar que la estructura es la adecuada para resistir las condiciones de trabajo requeridas.

- El robot está diseñado para proporcionar movilidad y maniobrabilidad en campos agrícolas, asegurándose de que el robot pueda adaptarse al terreno de cultivo irregular. Se espera que esta tecnología se adopte en el sector agrícola para aumentar la eficiencia y la producción de alimentos. Según [9] el emplear una rueda con este tamaño genera un buen coeficiente de rodadura. Por otro lado, el coeficiente de estabilización tipo Rocket ha funcionado muy bien en robots todo terreno como el Pionner 3AT.

- Se diseñó un mando que permitirá al usuario controlar el robot a distancia. Al ser una comunicación por radiofrecuencia se evita tener problemas de mala conexión o interferencias. El usar este tipo de tecnología proporciona una comunicación de 50 m en campo abierto.

- Se realizó el diseño para que el sistema tenga una autonomía mínima de 1 hora de trabajo.

.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se realizó el diseño de un robot móvil terrestre que será controlado remotamente que pueda rociar insecticida (dimetoato) en cultivos como melocotones, ciruelas, manzanas, albaricoques y árboles frutales de hasta 2,5 metros de altura para controlar plagas, enfermedades y malezas con una mínima intervención y asistencia humana.

Con base en los resultados por medio de cálculos y simulaciones se hizo la selección de materiales y componentes tanto mecánicos como electrónicos, los cuales constituirán el robot de manera adecuada para cumplir los objetivos planteados, todo esto basándose en la metodología del diseño mecatrónico, donde se aseguró que el diseño es funcional. También se diseñó un mando como interfaz de manera en que resulte fácil de entender y usar para el operador.

El enfoque de teleoperación demuestra ser una estrategia para reducir los riesgos que se asocian con la exposición directa a los pesticidas, además de aprovechar la experiencia del operador/agricultor. Esto representa una mejora en comparación con los métodos convencionales de fumigación y proporciona más seguridad para los agricultores como al medio ambiente.

El diseño del robot se ha realizado para garantizar la movilidad y maniobrabilidad en los campos de cultivo. Asegurándose que el robot se pueda adaptar a los terrenos irregulares de los cultivos. Se espera que esta tecnología encuentre adopción en el sector agrícola para mejorar la eficiencia y la producción de los alimentos.

Referencias

[1] A. Botta, P. Cavallone, L. Baglieri, G. Colucci, L. Tagliavini, G. Quaglia, A Review of Robots, Perception, and Tasks in Precision Agriculture, Appl. Mech. 3 (2022) 830–854. https://doi.org/10.3390/applmech3030049.

[2] E. Crist, C. Mora, R. Engelman, The interaction of human population, food production, and

biodiversity protection, Science (80-.). 264 (2017) 260–264.
[3] N. Ramankutty, Z. Mehrabi, K. Waha, L. Jarvis, C. Kremen, M. Herrero, L.H. Rieseberg, Trends in Global Agricultural Land Use: Implications for Environmental Health and Food Security, Annu. Rev. Plant Biol. 69 (2018) 789–815. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040256.
[4] N. Sindhwani, R. Anand, D.C. Verma, E.B. Valentina, IoT Based Smart Applications, 2022.
[5] Las plagas producen pérdidas de hasta un 40 por ciento en la producción agrícola, revela estudio de la FAO. | Agroasemex, S.A. | Gobierno | gob.mx, (n.d.). 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 (accessed August 16, 2023).
[6] P. González Ulibarry, Efecto de los plaguicidas sobre la salud humana, Com. Agric. Chile. 6.969–01 (2019) 1–8.
[7] S. Pookkuttath, R.E. Abdulkader, M.R. Elara, P. Veerajagadheswar, AI-Enabled Vibrotactile Feedback-Based Condition Monitoring Framework for Outdoor Mobile Robots, Mathematics. 11 (2023) 3804. https://doi.org/10.3390/math11183804.
[8] B. Robert, E.B. Brown, METODOLOGIA PARA CÁLCULO RÁPIDO DAS DIMENSÕES DE PNEUS DE TRATORES AGRÍCOLAS, (2004) 1–14.
[9] T. Thueer, R. Siegwart, Mobility evaluation of wheeled all-terrain robots, Rob. Auton. Syst. 58 (2010). https://doi.org/10.1016/j.robot.2010.01.007.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 8, pp. 87 – 98
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023.

Diseño de botiquín dispensador automático de medicamentos sólidos, mediante uso de sistemas embebidos

Mirelez Delgado Flabio Darío[1], Hernández González Umanel Azazael[1], Rico Mandujano Carlos Daniel[1], Caballero Varela Montserrat[1], Pinedo Suárez Rodolfo[1] y Muñoz Frayre Jovana Paola[1].

[1] Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Zacatecas, Zacatecas, México.
uahernadez@ipn.mx

Resumen

Los adultos de edad avanzada suelen tomar diversos fármacos por problemas de salud, ya sean a causa del envejecimiento o por otros factores; algunos de estos factores pueden afectar la memoria, movilidad, comprensión, entre otros. Estas complicaciones dificultan el correcto seguimiento del tratamiento, lo cual puede ocasionar repercusiones graves en la salud del paciente. Actualmente, en el mercado existen dispensadores de medicamentos que solventan la necesidad de un recordatorio a una hora específica, sin embargo, pueden llegar a ser costosos. Por este motivo, se realizó el diseño de un dispensador automático de medicamentos sólidos en el que se pueda organizar las dosis según su horario mediante una aplicación móvil, de igual manera, el sistema podrá mandar alarmas y notificaciones al usuario, familiar o al cuidador del paciente. También contará con sistemas de seguridad para evitar que terceros no autorizados accedan a los fármacos dentro del dispensador, así como con mecanismos para la administración, preservación y dispensación de los medicamentos.

Palabras clave: Alarmas, aplicación móvil, dispensador automático, medicamentos, diseño mecatrónico.

1. Introducción

En México, según el Instituto Nacional de Salud Pública, la mayoría de las causas de muerte en nuestro país son las enfermedades prevenibles, tales como enfermedades del corazón y diabetes [1]. Actualmente, estudios enfocados en la edad y calidad de vida de la población han demostrado que el 8% de los seres humanos, a nivel mundial, tiene más de 65 años, según el Monash Ageing Research Centre (MONARC) [2]. En ese sentido, se vuelve trascendente comprender que a esa edad las funciones mentales como: la memoria, la orientación, el juicio, el reconocimiento visual y la conducta, se ven afectadas por cambios propios del envejecimiento [3]. De acuerdo con [4], el 62.4% de las personas mayores de 65 años que sufre alguna enfermedad crónica, provocada por su edad y por el deterioro anteriormente referido, olvida su medicación; como consecuencia, podría causar el parcial o nulo cumplimiento de su tratamiento, coadyuvando a mayores problemáticas.

Por tal motivo, en el área del medicamento, se ha incorporado la robótica, la automatización y la informática a todo el proceso de dispensación y uso de los medicamentos aumentando la eficiencia, la calidad y la seguridad de la farmacoterapia del paciente. Un ejemplo ha sido el desarrollo de Sistemas de Dispensación Automatizada de Medicamentos (SADME), cuyo uso ha permitido mejorar la logística de distribución de medicamentos [5].

La aportación de este proyecto ofrece una opción con características similares a los ya existentes, pero a un precio más accesible, ya que diversos dispensadores automáticos de medicamentos en el mercado tienen precios que varían entre $1,000.00 MXN, que son básicos sin automatizar, hasta $28,000.00 MXN los más completos [6]. Sin embargo, los más económicos suelen tener problemas como poca capacidad, baja o nula seguridad, problemas de diseño, configuración y logística, entre otros, donde más del 50.0% de los clientes no están satisfechos con la adquisición de su producto [7].

En la actualidad se encuentran diferentes tipos de modelos de dispensadores de medicamentos, ya sean automáticos o no, en el mercado [8]. Hero Automatic Pill Dispenser El sistema Hero, funciona asignando un horario de dosificación junto con la cantidad de píldoras, siempre y cuando sean hasta 10 dosis diarias. Cuenta con luz intermitente, alarma y recordatorios al paciente o cuidador dentro de los próximos 15 min. Además de tener una aplicación móvil que proporciona información sobre las píldoras y analiza los medicamentos para alertar conflictos potencialmente peligrosos. LiveFine es un modelo de dispensador automático de medicamentos cuenta con 28 compartimentos con espacio para 18 píldoras, funciona utilizando plantillas para dosificar de una a seis veces al día, contiene alertas de audio y visuales (luz intermitente) hasta 30 minutos, función de bloqueo por medio de una llave y pantalla LCD. MedaCube, o alerta al paciente para que se tome su medicación, sino que también se pueden establecer alarmas personalizadas para aquellos que usan inyecciones o necesitan hacer ejercicios por fisioterapia en momentos específicos. En la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) del Ecuador, los alumnos Santiago Xavier Moscoso Nugra y Kleber Fernando Villacres Miranda desarrollaron un proyecto técnico cuyos objetivos fueron crear una máquina dispensadora diseñada en software de simulación CAD-CAE, una interfaz humano-máquina (HMI) amigable con el usuario y de utilidad a la persona de la tercera edad.

En respuesta a esta problemática, se plantea el diseño de un prototipo automático dispensador de medicamentos, el cual permitirá la dosificación de cápsulas y tabletas a través de una serie de mecanismos según el horario, la cantidad y el tipo de pastilla establecida por el usuario. Este dispositivo podrá almacenar y preservar los medicamentos dentro de la estructura principal. También se aplicará un sistema de alertas básico SMS y una aplicación móvil para configurar todos los aspectos antes mencionados. Asimismo, contará con un sistema de seguridad que restringirá su uso a personas no autorizadas.

2. Metodología

Para el desarrollo de este proyecto se diseñó un prototipo dispensador de medicamentos capaz de asistir a usuarios con algún problema, condición o enfermedad que le dificulte tomar sus medicamentos en los horarios preestablecidos. El dispensador administra los fármacos para posteriormente, suministrarlos ajustándose a las dimensiones físicas de las pastillas y comprimidos, permitiendo así la correcta selección de la cantidad a dispensar. La dosis y el horario los definirá el usuario a través de una aplicación móvil. El sistema de almacenamiento y dispensación se compone de 10 compartimentos que preservan los medicamentos con una capacidad mínima de 30 pastillas o comprimidos dependiendo de las dimensiones físicas de las mismas. Además de mecanismos aptos para identificar, ordenar y seleccionar las pastillas/tabletas correspondientes a la dosis especificada.

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.

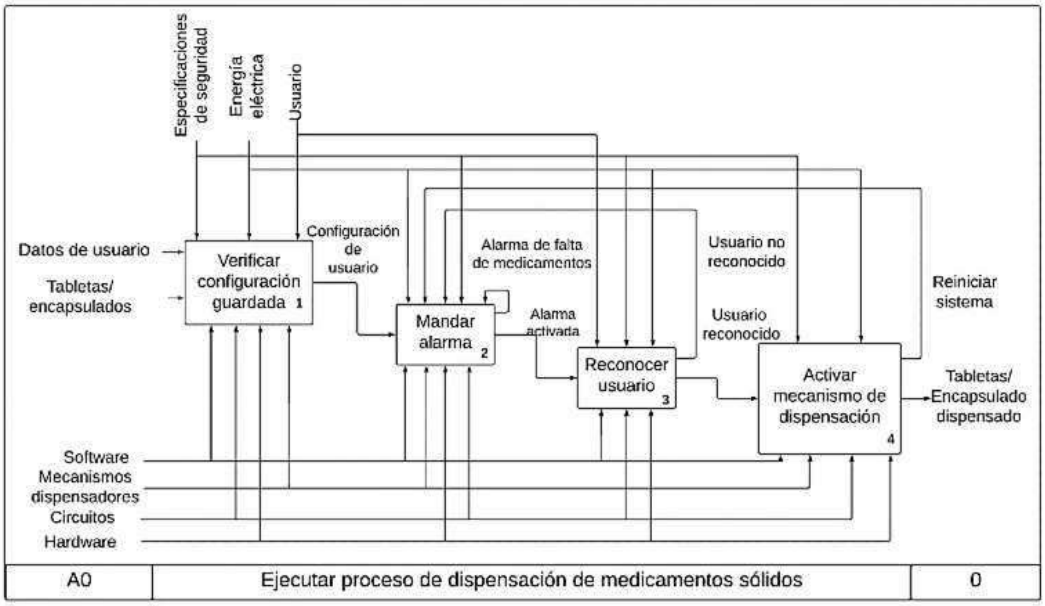


Figura 1. Diagrama A0. Proceso de selección e identificación del dispensador automático de medicamentos sólidos.

2.2 Diseño Mecánico

En base en la Tabla 1, se tienen los volúmenes y dimensiones mínimas y máximas de las cápsulas (medicamentos). Teniendo estas medidas como referencia, se diseñó el contenedor para que contenga espacio suficiente para 30 pastillas.

Tabla 1. Dimensiones de cápsulas.

Tamaño	**000**	**00**	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Volumen (ml)	1.37	0.95	0.68	0.50	0.37	0.30	0.21	0.13
Peso (mg)	163	123	96	76	61	48	38	28
Longitud total (mm)	26.1	23.5	21.7	19.4	18.0	15.9	14.3	11.1
Diámetro del cuerpo (mm)	9.55	8.20	7.34	6.63	6.07	5.57	5.05	4.68

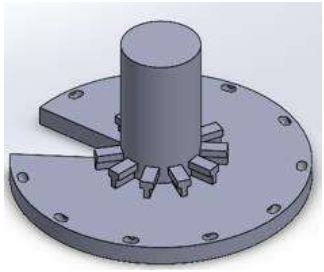
El volumen máximo de una cápsula es de 1.37 ml o bien 1370 mm3 según (1).

$$(1370\ \text{mm}^3)(30\ \text{pastillas}) = 41{,}000\ \text{mm}^3 \tag{1}$$

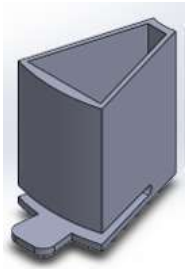
Asimismo, se desea que el diámetro de la base sea de 15 cm para que las dimensiones de la carcasa sean ideales y haya una buena distribución de todas las partes, además, de un espesor de 2 mm para cada compartimento. Con estos datos se puede obtener la altura mínima. Por otro lado, se tiene en cuenta que el interior del compartimento tiene forma de prisma trapezoidal en base a (2).

$$h = \frac{V}{A} = \frac{41{,}100\ \text{mm}^3}{\frac{(36.91\ mm + 9.33\ \text{mm})(46.96\ \text{mm})}{2}} = 37.85\ \text{mm} \tag{2}$$

Tomando esto en cuenta, la altura será de 5 cm para tener un margen de error. Conociendo el tamaño de los compartimientos (Figura 2(b)) se procedió a diseñar una base, en dónde colocarlos. La base se muestra en la Figura 2(a) la cual cuenta con una serie de carriles y un pequeño agujero donde los compartimentos podrán acoplarse, para que el usuario pueda desmontarlos cuando se requiera rellenarlos. Los compartimentos se acoplan con un riel ubicado en la base.



(a) base



(b) Compartimiento individual

Figura 2. Diseño CAD del dispensador automático de medicamentos sólidos.

Para seleccionar el motor adecuado, se calculó el torque necesario para mover la base. Para ello, se usa (3).

$$\tau = I\alpha \tag{3}$$

Para realizar los cálculos de Inercia, se asumió la forma geométrica de la base como un cilindro, donde I es igual a (4).

$$I = \frac{1}{2}mr^2 \tag{4}$$

Para la masa, se sumaron los pesos de la base, los 10 contenedores hechos de ABS y la cantidad máxima de pastillas, ya que este peso será el usado para calcular el torque máximo necesario para mover la base. Teniendo que el radio de la base (r) es igual a 0.075 m y sustituyendo en (2) se tiene (5).

$$I = \frac{1(2.2kg)0.075m^2}{2} = 0.0061875\ Kg \cdot m^2 \tag{5}$$

La aceleración angular α es igual a (6).

$$\alpha = \frac{\omega_f}{t} \tag{6}$$

Ya que no se necesita velocidad sino precisión, se propone una velocidad angular de 60 rpm (1 rps) y un tiempo de aceleración de 0.2 segundos. Se calcula empleando (7) y (8).

$$\alpha = \frac{6.28318\frac{rad}{s}}{0.2s} = 31.4159\ \frac{rad}{s^2} \tag{7}$$

$$T = (0.0061875\ Kg \cdot m^2)\left(31.4159\ \frac{rad}{s^2}\right) = 0.19438\ N \cdot m \tag{8}$$

Se concluye que se necesita un torque mayor a 0.19438 N·m para vencer la fuerza de inercia y hacer rotar la base. Sin embargo, se elegirá un motor con un valor de torque por lo menos 2 veces más alto para evitar errores. Basados en este resultado, se eligió un motor Nema 23 con la capacidad de dar un torque de casi 0.90 Nm a 200 pps (60 rpm).

Al mismo tiempo se diseñó una carcasa principal (Figura 3) para contener todos los mecanismos y circuitos correspondientes; una abertura para la pantalla y un espacio abierto donde se dispensarán los medicamentos. Tendrá una compuerta lateral para rellenar los compartimentos y respiraderos para los ventiladores. Se seleccionó un acero inoxidable 304 calibre 18, debido a que es un material muy dúctil, presenta una excelente resistencia a la corrosión, no es magnético, presenta muy buena soldabilidad y lo más importante, tiene un excelente factor de higiene y limpieza.

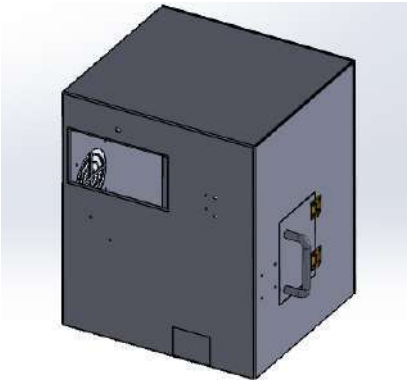


Figura 3. Carcasa del dispensador.

El peso de toda la base y los contenedores descansará sobre el eje del motor, por lo que se diseñó un soporte para evitar que las fuerzas producidas al desmontar algún contenedor provoquen que la base se incline (Figura 4).

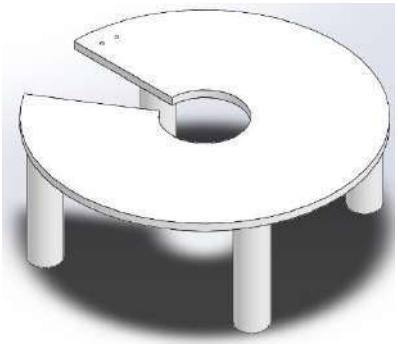


Figura 4. Soporte.

Para dispensar las pastillas fácilmente, se diseñó un mecanismo piñón-cremallera, capaz de extraer pastillas individuales de los contenedores mediante un sistema de succión. Se eligió como configuración inicial la mostrada en la tabla 2 en donde se proponen 15 dientes y un diámetro primitivo de 30 mm.

Tabla 2. Configuración piñón.

Nombre	Designación	Fórmula	Valor
Angulo de presión	α		20º
Dientes	z		15
Diámetro primitivo	d		30mm
Módulo	m	d/z	2
Paso	P	m*π	6.2832
Diámetro exterior	de	$d + 2m$	34mm
Diámetro interior	di	$d - 2 * 1.167 * m$	25.33mm
Diámetro de forma	df	$d * 0.93969$	28.19mm
Ancho de diente	e	$0.5 * P$	3.14mm
Radio de diente	r	$0.3 * m$	0.6mm

El piñón será conducido por un motor a pasos, y tendrá que encajar con la cremallera permitiendo que ésta se mueva en un solo eje. Para ello, se diseñó una carcasa para alojar todos los componentes y mantenerlos en su lugar. En la Figura 5 se pueden observar las 2 posiciones del sistema, el cual será controlado con un motor a pasos. Una ventosa será acoplada al final de la cremallera.

(a) Posición arriba(b) Posición abajo

Figura 4. Ensamble mecanismo de succión.

De acuerdo con [15] se tiene una densidad en las pastillas mínima de ρ = 0.6 g/ml y máxima ρ = 1.2 g/ml, entonces, a partir de la ecuación de la densidad, se obtiene la masa mínima y máxima de las pastillas. Se selecciona una ventosa XP-U10 cuyas características se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones de ventosa XP-U10.

Diámetro de la copa: in [mm]	10 mm
Diámetro externo: in [mm]	0.43 [11.0]
Altura de la copa: in [mm]	0.41 [10.4]
A través del agujero: in [mm]	0.14 [3.6]
Carrera: in [mm]	0.02 [0.5]
Peso de la copa: oz [g]	0.03 [10.9]
Volumen ineterno: cu in [cc]	0.01 [0.2]
Fuerza @ 6 inHG: lb [n]	0.34 [0.5]
Fuerza @ 18 inHG: lb [n]	1.00 [4.5]
Radio mínimo: in [mm]	0.31 [7.9]

Para colocar la ventosa se requiere un conector adecuado a su tamaño se eligió el modelo 10-18F. Para poder unir la ventosa al generador de vacío, se seleccionó una manguera con un diámetro interno 4 mm.

2.3 Diseño Electrónico

Para el sistema eléctrico/electrónico de la bobinadora se emplearon algunos elementos como:

- Microcontrolador. Raspberry Pi (uno), ATMega 2560 (uno).
- Sensores. DHT11, SMS SIM800L EVB, NFC PN532 y cámara para Raspberry.
- Controladores. Controlador Cerradura Solenoide, Buzzer, y un controlador A4988.
- Fuente de poder. ATX 750 W.

Para reconocer al usuario mediante visión artificial, se usará la cámara para Raspberry. Para implementar el método de desbloqueo por NFC, se hará uso de un módulo PN532. Para enviar mensajes SMS, se usará un módulo SIM800L EVB. En la Figura 5, se muestra los esquemas completos de conexiones, a excepción de los componentes que serán conectados mediante USB o puerto HDMI.

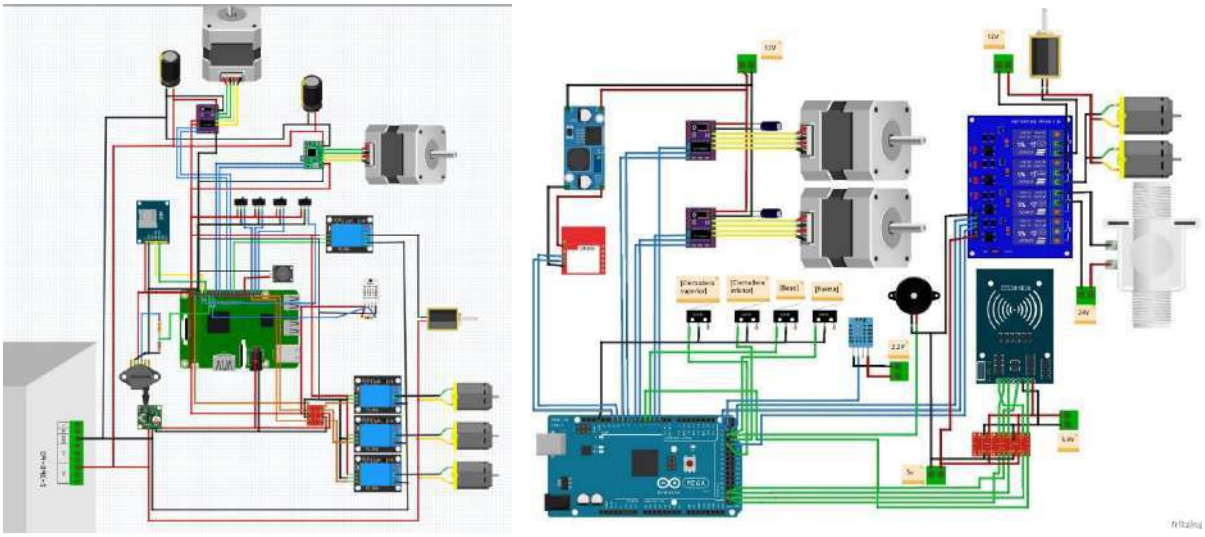


Figura 5. Esquema completo de conexiones.

2.3 Diseño de la Aplicación e interfaz

Tanto la aplicación móvil como la interfaz de usuario cuentan con cinco secciones principales:

- **Alarmas**: Permite programar todas las alarmas dependiendo del medio por el que se enviarán (SMS, notificaciones de dispositivo móvil, alertas sonoras y visuales) y a quien deberán ser enviadas (administrador, cuidador, familiar, etc.).
- **Pastillas**: En este apartado se permite registrar pastillas y guardar la información necesaria respecto a éstas (nombre de pastilla, cantidad y caducidad).
- **Horarios**: Se crean horarios a partir de las dosis registradas para su dispensación, estos horarios contienen la información de cuándo, a qué hora y con cuánta frecuencia se deberán de dispensar los medicamentos.
- **Seguridad**: Se configuran las diferentes opciones de seguridad que ofrece el dispensador (reconocimiento facial, PIN y tarjeta NFC). El usuario puede elegir varias opciones a la vez o ninguna, dependiendo del nivel de seguridad que se requiera.
- **Dosis**: Una vez que se ha registrado por lo menos una alarma, una pastilla y un horario, será posible crear una dosis que contenga todos los elementos mencionados.

El programa que será ejecutado en el sistema operativo de la placa de desarrollo tiene la opción de funcionar sin conexión a internet y actualizarse una vez se establezca una conexión; de esta forma, se le podrá ofrecer el servicio a personas que no cuentan con éste.

Se realizó un análisis para determinar los requerimientos funcionales RF (Tabla 4) y no funcionales RNF (Tabla 5) del proyecto para desarrollar la aplicación.

Se diseñó un diagrama de clases para entender mejor la estructura necesaria para desarrollar la aplicación. El diagrama de clases se muestra en Figura 6.

Tabla 4. Requerimientos funcionales.

Nombre	Identificación	Descripción
Acceder a contenedores	RF_01	Manda una señal al sistema de control para mover el motor en una posición especifica y abrir o cerra la puerta de acceso a los contenedores para agregar o eliminar pastillas.
Configurar dosis	RF_02	Permitirá agregar, eliminar o modificar datos de horarios, alarmas, pastillas y opciones de seguridad para formar una dosis. así como modificar los datos necesarios relacionados a éstos.
Aplicación móvil	RF_03	Este requerimiento explica las características de la aplicación móvil.
Interfaz de usuario	RF_04	Este requerimiento explica las características de la interfaz de usuario en el dispensador.
Mostrar datos	RF_05	Deberá mostrar los datos de todas las dosis por medio de la aplicación o la interfaz de usuario.
Activar cámara	RF_06	Activará la cámara para ser usada por el sistema de reconocimiento de usuario mediante visión artificial.
Activar módulo NFC	RF_07	Activará el módulo NFC para ser usado por el sistema de reconocimiento de usuario mediante tarjeta NFC
Activar módulo SMS	RF_08	Activará el módulo SMS para ser usado por el sistema de envío de alarmas
Regular temperatura	RF_09	Manda una señal de la placa de desarrollo que activa el sensor de temperatura para obtener dicho valor y activa o desactiva los ventiladores para ayudar a regular la temperatura.
Activar sistema de dispensación	RF_10	Activa el sistema que permite activar o desactivar el motor y el pistón

Tabla 5. Requerimientos funcionales.

Nombre	Identificación	Descripción
Almacenar datos	RNF_01	Almacenar los datos obtenidos y guardarlos en una base de datos
Modificar datos	RNF_02	Los datos de las dosis solo podrán ser modificados por un administrador.
Conectividad	RNF_03	El software deberá ser capaz de conectarse al dispensador mediante wifi o bluetooth.
Almacenamiento de datos localmente	RNF_04	El software instalado en la placa de desarrollo del dispensador deberá ser capaz de funcionar sin conexión a internet y guardará datos localmente hasta que se encuentre una conexión a internet.
Diseño simple e intuitivo	RNF_05	La aplicación deberá tener una estructura clara, un diseño simple e intuitivo pensando en que el público objetivo son personas mayores.
Procesar Señales	RNF_06	Manipular los datos que se obtuvieron de los sensores para poder ser usados por el sistema.

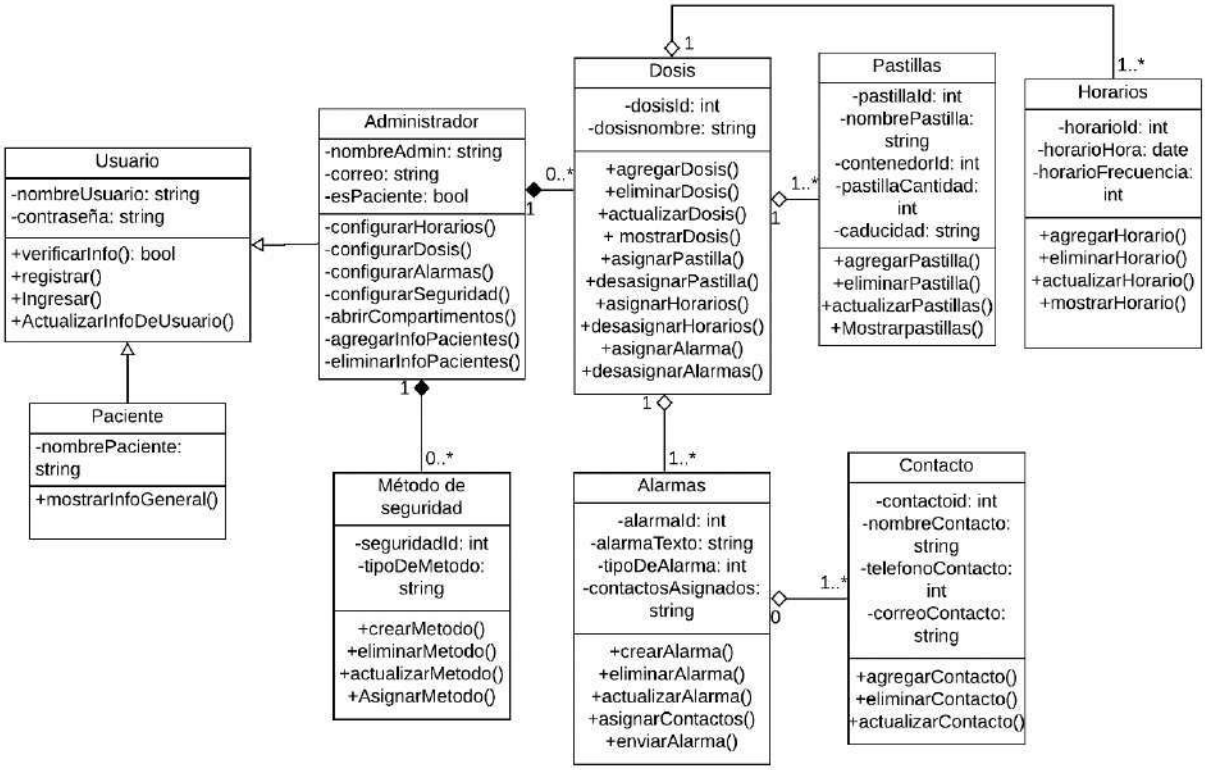


Figura 6. Diagrama de clases UML.

3. Resultados

Este sistema será capaz de asistir a usuarios con algún problema, condición o enfermedad que le dificulte tomar sus medicamentos en los horarios preestablecidos. El dispensador administra los fármacos para posteriormente, suministrarlos ajustándose a las dimensiones físicas de las pastillas y comprimidos, permitiendo así la correcta selección de la cantidad a dispensar. La dosis y el horario los definirá el usuario a través de una aplicación móvil.

El sistema de almacenamiento y dispensación se compone de 10 compartimentos que preservan los medicamentos con una capacidad mínima de 30 pastillas o comprimidos dependiendo de las dimensiones físicas de las mismas. Además de mecanismos aptos para identificar, ordenar y seleccionar las pastillas/tabletas correspondientes a la dosis especificada. Para esto, se desarrolló una aplicación móvil y una interfaz para configurar el dispensador automático, registrar los medicamentos, definir configuraciones y aspectos generales. Asimismo, se enviarán notificaciones con la finalidad de informar al usuario, algún familiar o encargado de asuntos relacionados con el paciente, el dispensador, o las pastillas.

Se diseñó un sistema de seguridad con tres opciones (tarjeta NFC, contraseña PIN y reconocimiento facial). El usuario podrá elegir la opción de su preferencia con el fin de evitar que usuarios no autorizados tengan acceso a los medicamentos. En la Figura 7 se muestra la estructura propuesta para el Botiquín dispensador automático de medicamentos sólidos. La carcasa cuenta con una abertura para el vaso por donde el usuario obtendrá los medicamentos. De igual manera, cuenta con una pantalla táctil, compuerta para acceder a los compartimentos y rellenarlos; se tienen respiraderos para los ventiladores y los agujeros para tornillos con la finalidad de que los elementos que requieran queden sujetos.

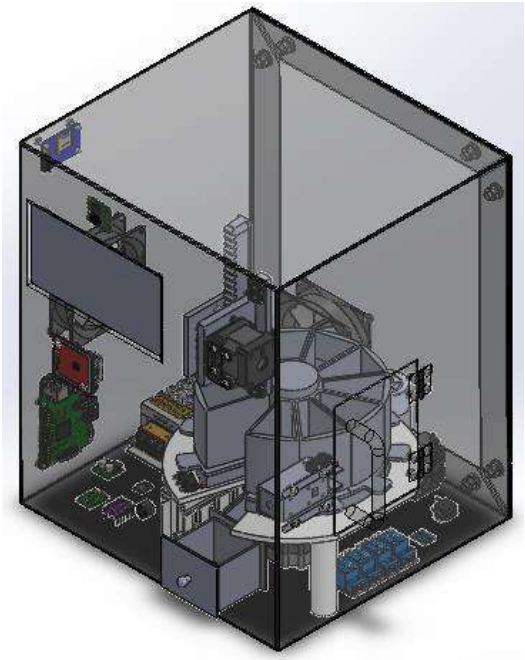
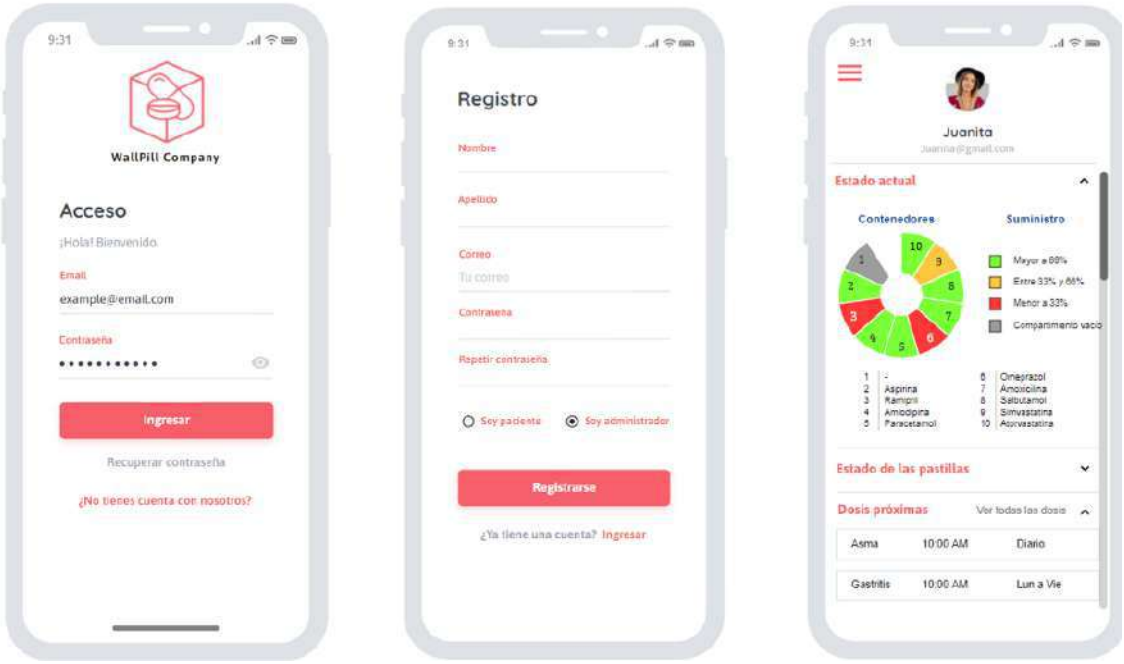


Figura 7. Diseño completo de botiquín dispensador automático de medicamentos sólidos.

Se desarrollaron con base en los esquemas la aplicación, en donde se implementaron distintas pantallas para que los usuarios puedan interactuar con el sistema. En la figura 8 se muestran las principales pantallas.



(a) Página de inicio (b) Registro (c) Inicio

Figura 8. Pantallas de la interfaz.

El sistema de reconocimiento facial se implementará en tres etapas:

- **Detección facial**: Se utilizará el método de Haar cascade para identificar rostros en fotos o videos. el sistema será capaz de detectar rostros en diferentes posiciones, diferente iluminación, diferente edad e incluso con texto o elementos cubriendo parcialmente el rostro.

- **Entrenamiento**: Una vez se obtengan las fotos del individuo, el siguiente paso es el entrenamiento de la red neuronal. Para ello, se utiliza el algoritmo LBPH (Local Binary Pattern Histogram). El modelo resultante es guardado en un archivo XML que se almacena tanto localmente como en el servicio de almacenamiento de Firebase.

- **Reconocimiento facial**: Una vez se cuente con el modelo resultante del entrenamiento, éste es usado en un nuevo script que permite el reconocimiento facial de una manera muy sencilla, el cual compara los rasgos del rostro detectado y el modelo guardado para determinar la probabilidad de que se trate del rostro deseado.

.

4. Conclusiones

Tomando en cuenta la metodología del diseño mecatrónico, se siguió una serie de pasos para elegir la opción más viable de acuerdo con las métricas preestablecidas. Para diseñar una carcasa capaz de contener los compartimentos, mecanismos y circuitos, se optó por una estructura rectangular hecha de acero inoxidable 304 ya que presenta buena resistencia a la corrosión, soldabilidad y un factor de higiene y limpieza muy alto; además, es accesible y servirá para preservar los medicamentos. Esta estructura, contará con las medidas adecuadas para la distribución de todas las partes y requerimientos del dispensador.

La aplicación móvil e interfaz gráfica, se diseñó de manera que el usuario tenga acceso a información relevante del paciente, el dispensador y las pastillas. Además, podrá registrar los medicamentos con datos como nombre, caducidad y cantidad; personalizar sus alarmas con hora, fecha y tipo de notificación, así como configurar opciones de seguridad, recordatorios, aspectos personalizables de la aplicación, etc.

Por otro lado, se eligió un mecanismo de succión ya que las pastillas se pueden manipular fácilmente de forma individual; esto podría ser una desventaja por los tiempos de dispensación, sin embargo, resulta más seguro y preciso para evitar dosis equivocadas. Para conservar y administrar los medicamentos, se diseñó una base y una serie de compartimentos para almacenarlos y tenerlos listos para ser dispensados.

Se plantearon una serie de componentes electrónicos con la finalidad de realizar todo el funcionamiento y comunicación del dispensador basados en las necesidades del sistema, considerando aspectos como precio, facilidad de adquisición y uso, requerimientos energéticos, etc. Una vez seleccionados, se eligió una fuente adecuada.

Para evitar accesos no autorizados tanto a los medicamentos como a los circuitos, el usuario podrá elegir (acorde a sus preferencias) entre tres opciones de seguridad: NFC, PIN o reconocimiento del usuario. Además, se usarán tornillos de seguridad para restringir el acceso al interior del dispensador y evitar que se manipulen sus componentes.

Una vez obtenido el diseño mecatrónico completo, incluyendo la estructura, mecanismos, circuitos electrónicos, interfaz humano máquina y los elementos de visión artificial, se tiene la base para comenzar con la construcción del prototipo y posteriormente la validación de este con pruebas en campo. Es importante resaltar que en este trabajo solo se abarcan seis de las nueve etapas de la metodología de diseño mecatrónico las cuales fueron; identificación de necesidades, análisis del problema, preparación de especificaciones, generación de posibles soluciones, selección de la solución adecuada y el diseño detallado.

Agradecimientos

U. Hernández Gonzalez agradece el apoyo del IPN a través de la SIP con el proyecto 20232077. Tambien agradecer al Dr. Sergio Domínguez Sánchez, al M. en C. Rafael Reveles Martínez, al M. en C. Ramon Jaramillo Martínez y a la C. Jazmín Abigail Mena Zamora por su apoyo.

Referencias

[1] C. Crema, A. Depari, A. Flammini, M. Lavarini, E. Sisinni, A. Vezzoli, A smartphone-enhanced pill-dispenser providing patient identification and in-take recognition, 2015 IEEE Int. Symp. Med. Meas. Appl. MeMeA 2015 - Proc. (2015) 484–489. https://doi.org/10.1109/MeMeA.2015.7145252.

[2] S.A. Ward, S. Parikh, B. Workman, Health perspectives: International epidemiology of ageing, Best Pract. Res. Clin. Anaesthesiol. 25 (2011) 305–317. https://doi.org/10.1016/j.bpa.2011.05.002.

[3] Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), Guía de Referencia Rápida Diagnóstico y Tratamiento del Deterioro Cognoscitivo en el Adulto Mayor en el Primer Nivel de Atención Guía de Práctica Clínica GPC, Guía Práctica Clínica. (2012) 1–15. http://www.imss.gob.mx/sites/all/statics/guiasclinicas/144GRR.pdf.

[4] R. Mathur, V. Pathak, D. Bandil, Emerging Trends in Expert Applications and Security, 2019. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2285-3.

[5] J. Zafra Fernández, B. Isla Tejera, J. Del Prado Llergo, Efecto de un sistema automático de dispensación de medicamentos sobre el gasto farmacéutico y el grado de satisfacción del usuario, Enfermería Glob. 11 (2012) 250–261. https://doi.org/10.6018/eglobal.11.1.143141.

[6] K.L. Tsai, B.Y. Liau, Y.M. Hung, G.J. Yu, Y.C. Wang, Development of smart pillbox using 3D printing technology and convolutional neural network image recognition, Sensors Mater. 32 (2020) 1907–1912. https://doi.org/10.18494/SAM.2020.2632.

[7] N. Solanki, D.P.H. Zope, Smart Pill Box Health Care System, Int. Res. J. Eng. Technol. Factor. (2008) 919–928. www.irjet.net.

[8] J. Kacprzyk, O. Kaynak, W. Pedrycz, M.M. Polycarpou, J. Wang, Lecture Notes in Networks and Systems Volume 448 Series Editor, n.d. https://link.springer.com/bookseries/15179.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 9, pp. 99 – 113
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Concepto de diseño de un sistema mecatrónico AS/RS empleando cuadricóptero

Mendoza Vázquez Antonio Raymundo, Torres Méndez Sergio Javier,
Mendoza Vázquez José Rafael, Rojas Cuevas Irma Delia y Ramírez Palacios Vicente

Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Puebla.
Av. Del Tecnológico 420, Col. Maravillas, C.P. 72220, Puebla, Puebla.
antonioraymundo.mendoza@puebla.tecnm.mx

Resumen

En este artículo se presenta el concepto de diseño de un sistema de almacenamiento automatizado y recuperación (por sus siglas en inglés AS/RS: Automated Storage and Retrieval System), empleando un cuadricóptero como medio de selección de artículos. El objetivo es guiar al cuadricóptero a través de un rack de almacenamiento mediante una red de sensores ultrasónicos. La comunicación será inalámbrica y mediante algoritmos y trazado de trayectorias se podrá realizar la tarea de posicionamiento deseado. Se presenta el análisis de proyectos análogos, la metodología empleada para el diseño del sistema, el avance y desarrollo del sistema; así como, los diagramas y algoritmos utilizados. Finalmente se presenta la discusión de los resultados y conclusiones, al igual que las aplicaciones y ventajas que el sistema ofrece.

Palabras clave: cuadricóptero, AS/RS, arquitectura de control.

1. Introducción

Los Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV, por sus siglas en inglés *Unmanned Aerial Vehicles*) se están convirtiendo en una herramienta auxiliar para la logística, sumado al extenso desarrollo en la automatización de estos, su rol fundamental en la *industria 4.0* y las ventajas que ofrecen por su amplio espacio de trabajo y versatilidad para adaptarse a múltiples tareas.

En la industria actual, cada vez son más los sistemas de almacenamiento y selección de mercancías que incorporan vehículos aéreos no tripulados; sin embargo, aún existen necesidades que limitan el uso de los UAV en las tareas de almacenamiento, entre esas necesidades figuran el anclaje de carga; la autonomía del dispositivo; estabilidad y posicionamiento; la disposición de áreas de ascenso y descenso; mantenimiento; entre otras problemáticas.

Grandes empresas han apostado por la logística de UAV's al exterior, como Walmart [1] o Amazon [2], ignorando que hay un proceso previo que implica anclar el paquete al UAV con operación humana, y que de la misma forma que existe un sistema de entrega en el interior del almacén. Por lo tanto, existe un área de oportunidad en la cual, se pueden utilizar los mismos UAV's para realizar tareas de entrega y carga de pequeños productos dentro del almacén, de forma autónoma y con lo cual se permita reducir la participación humana y agilizar tiempos de entrega.

De acuerdo con la definición de Conveyco, a través de su autor Romaine [3], un sistema AS/RS (del inglés *Automated Storage and Retrieval System*), o bien, un Sistema Automatizado de Almacenamiento y Recuperación, es un tipo de tecnología de automatización de almacén específicamente diseñada para resguardo y entrega de productos e inventario en demanda. Cada día aparecen nuevos sistemas de almacenamiento del tipo AS/RS, los cuales apuestan por otro tipo de configuraciones como los robots móviles o los UAV's. Estos últimos han recibido un amplio y

exhaustivo desarrollo en los últimos años, y parte de ese desarrollo ha permitido que los UAV's puedan incorporarse a los sistemas de almacenamiento automatizado.

La ventaja de los UAV's frente a los robots prismáticos que dominan los sistemas AS/RS es su amplia área de trabajo, no dependen de rieles, pueden evitar obstáculos y no sufren modificaciones físicas si el *rack* de almacenamiento es ampliado o reducido. De acuerdo con la empresa Ractem [4], los *racks* son estructuras metálicas, una especie de grandes estanterías metálicas que permiten un almacenaje óptimo de los diversos productos de un almacén o cualquier otro espacio. Debe mencionarse que, aunque la palabra "*rack* de almacenamiento" pueda sonar redundante, permite a cualquier lector familiarizarse con el tema, a diferencia de usar solamente la palabra "*rack*" la cual podría llegar a confundir a un lector sin experiencia en el tema.

El sistema propuesto consiste en un cuadricóptero y un *rack*, la comunicación entre estos elementos será de forma inalámbrica. El *rack* contiene una red de sensores ultrasónicos en su frente para mapear los objetos que se encuentren enfrente de este y otra red en la parte interna para monitorear las repisas. Conforme el *rack* detecte existencias de artículo, realizará el procesamiento y ejecutará los algoritmos para enviar al cuadricóptero las instrucciones adecuadas para que este pueda moverse a la posición deseada donde se ubicará el artículo, la red de sensores en el frente se encargará de guiar al cuadricóptero y validar si este llegó a la posición deseada.

1.1. Marco contextual

Ya existe desarrollo en cuanto a la automatización de cuadricópteros dentro de almacenes. De acuerdo con Heater [5], la empresa Corvus Robotics, desarrolla UAV's para interiores y almacenes. La tarea de los UAV's desarrollados por Corvus Robotics es circular en un almacén e ir escaneando códigos de barras mediante cámaras, para que esa información llegue a la base de datos del inventario. Lo atractivo del proyecto es que los cuadricópteros no necesitan ser controlados por la acción humana porque disponen de la instrumentación y algoritmos necesarios para la navegación.

En cuanto a sistemas AS/RS que dispongan de anclaje de artículos, la empresa Flying Norlin Project desarrolló un pequeño sistema de almacenamiento en 2015 para conmemorar los 10 años de la empresa Crocs en Japón, como lo reportó Smith [6]. Su sistema consiste en varias repisas inclinadas donde están colocados unos soportes con imán que sostienen unos zapatos. Mediante sensores de proximidad y un programa de computadora, un cuadricóptero navega por encima de las repisas hasta posicionarse encima del par elegido por el usuario mediante una tableta. El cuadricóptero mediante un magneto toma el par para luego depositarlo en una red donde el usuario puede recoger el modelo seleccionado.

Un sistema que integra tanto el control de inventarios como la selección y anclaje de productos es el proyecto Flybox desarrollado por la empresa Linde, de acuerdo con la revista digital manutención&almacenaje.com [7]. Este prototipo de cuadricóptero se desplaza junto a un apilador automatizado L-Matic, este último controla los movimientos del cuadricóptero y le suministra energía mediante un cable. El cuadricóptero se vale de cámaras y visión artificial para ir escaneando códigos de barras, en este proyecto el UAV es una extensión de un proyecto mayor como lo es el apilador automático, el cual es la apuesta fuerte para la empresa Linde.

Los sistemas AS/RS que integran a un cuadricóptero como componente interactivo se pueden ver en la figura 1, en la imagen de la izquierda se observa el cuadricóptero de Corvus Robotics, mientras que en la imagen central se observa el sistema de Flying Norlin Project y en la imagen de la derecha se puede observar el cuadricóptero incorporado al montacargas automático de la empresa Linde. El proyecto de Corvus Robotics y Linde son muy similares; sin embargo, el de Corvus Robotics dispone de más cámaras para evitar girar sobre su propio eje, mientras que el de Linde es un auxiliar para control de inventarios, además de la autonomía que le da llevar una fuente de poder moviéndose con el mismo cuadricóptero. El proyecto de Flying Norlin Project puede cargar artículos

livianos y transportarlos hasta un lugar de recolección, además de que la mayoría de su procesamiento se realiza en una computadora externa al cuadricóptero.

Figura 1. Sistemas AS/RS en el mercado. Obtenidos de [8]**,** [6]**,** [7]**.**

Para diseñar un sistema, se necesita establecer una arquitectura de control. De acuerdo con García Barroso [9], una arquitectura de control es una representación gráfica detallada de los equipos de control, comunicación y supervisión de una planta, subproceso o máquina, incluyendo las redes y buses de comunicación, también se le conoce como topología de red. A la vez el mismo autor comenta que una buena arquitectura de control debe permitir de manera sencilla: visualizar el sistema de control; identificar equipos y sus características principales; identificar redes y nodos de comunicación; y cuantificar puertos ocupados y libres. Como se puede inferir, la definición de arquitectura de control de García Barroso está estrechamente relacionada a redes y protocolos; sin embargo, en un sentido más amplio también puede involucrar elementos que no sean necesariamente dispositivos de red, con la finalidad de identificar todos los componentes del sistema y saber cómo están relacionados, así como la incorporación de los diagramas de flujo de la programación y los conceptos de la teoría de control.

El objetivo de la arquitectura de control a diseñar consiste en adecuarse a las necesidades particulares de la industria del almacenamiento. La versatilidad del UAV debe permitir que este dispositivo pueda reconfigurar su programación de acuerdo con la disposición del almacén o las necesidades de la empresa, esta idea ya fue propuesta de forma general por Deng et al [10], donde acuña las siglas RFCSA (en inglés *Reconfigurable Flight Control System Architecture*) para referirse a un Arquitectura Reconfigurable de Sistema de Control de Vuelo. Una RFCSA permite combinar las inquietudes ingenieriles, tecnológicas y las propias del cliente, Deng et al [10] comenta que las consideraciones para tener en cuenta son que el sistema RFCSA sea simple y tenga un diseño modular; sea fácil de adaptar a aplicaciones de alto nivel; que el sistema se pueda modificar si llega a cambiar la aplicación; cuente con un bajo costo y sea un sistema confiable.

Pastor et al [11] definen que los UAV son controlados por una computadora embebida a la que llaman Sistema de Control de Vuelo FCS (por sus siglas en inglés *Flight Control System*), el cual es un sistema que lee información de una amplia variedad de sensores y dirige al UAV conforme al plan de vuelo. Se puede notar que con la notación de RFCSA de Deng et al [10], la propuesta es anidar al Sistema de Control de Vuelo FCS una Arquitectura Reconfigurable para que ese FCS pueda ser reutilizable y adaptable a las necesidades de la aplicación.

En cuanto a algoritmos, los autores Jia y Song [12] comentan que para lograr un control preciso del UAV, primeramente, se colectan los datos de los sensores y la información de vuelo del UAV, entonces los parámetros de destino correspondientes son obtenidos de acuerdo con las diferentes rutas de planificación y se calculan las señales que van a los motores de acuerdo con los algoritmos de posición y altitud. Jia y Song [12] han desarrollado la arquitectura de control para la automatización de un UAV basado en una red inteligente de sensores para navegación en exteriores, un proyecto similar al que se presenta en este artículo.

Como lo comentan Lara Sosa et al [13], un sistema de control es completamente controlable, si es posible transferir al sistema del cuadricóptero desde un estado inicial arbitrario, siempre y cuando esté en torno al punto de equilibrio hacia cualquier estado deseado en un tiempo finito,

aplicando matrices de estados, ecuaciones, entre otros. De la misma forma, Lara Sosa et al [13] concluyen que al momento de diseñar una estrategia de control es de vital importancia desarrollar un modelado matemático adecuado, y que el modelo del cuadricóptero debe ser no lineal, inestable y complejo por su naturaleza de diseño y la interacción con el medio en el cual se encuentre.

Sobre la red de sensores ultrasónicos, como lo indican Hazas y Hopper [14], los sistemas de localización ultrasónicos han probado ser relativamente simples, ser una solución efectiva para el posicionamiento en interiores, además de que los transductores ultrasónicos son baratos y que tienen requerimientos de bajo procesamiento contra las complicaciones de los sistemas de visión computarizada. Se debe incluir que tal afirmación no indica que se deben sustituir los sistemas de visión computarizada en detrimento de los sensores ultrasónicos, sino que deben complementarse ambas soluciones para obtener sistemas más precisos en cuanto a control automatizado de UAV's.

Aunque el concepto de "Arquitectura de Control" está estrechamente ligado con las topologías de red, esto no exime que también se pueda realizar un análisis profundo en cuanto a las conexiones de elementos y sus protocolos de comunicación, Corteggiano et al [15] comentan que cuando se plantea una arquitectura de comunicación, se hace necesario un *middleware* (capa intermedia de software, también se puede ver como una interfaz de usuario) que facilite la abstracción de los detalles de red y sus parámetros para centrarse en lo que es relevante desde el punto de vista del diseño y operación.

Sobre algoritmos, Dargham et al [16] comentan el método aplicado casi universalmente para el control de UAV's es el uso de un sistema de control electrónico automático en forma de autopiloto; los sistemas electrónicos emplean una característica llamada retroalimentación, o bien operación de lazo cerrado, con el cual se puede implementar un controlador proporcional-integral-diferencial (PID), el cual calcula el valor del error como la diferencia entre una variable de proceso adquirida y un valor fijo deseado.

De acuerdo con Capello et al [17], los sistemas de autopiloto para UAV's, ya sean comerciales o de desarrollo están diseñados para realizar una navegación basada en puntos de ruta *(waypoint*) de GPS, este control de seguimiento está separado en diferentes etapas: retroalimentación para el control de la señal "pitch" y "roll" (movimiento lateral o frontal); un lazo exterior para el control de la altitud y el seguimiento de puntos. El proyecto por desarrollar prescinde del GPS, sin embargo, mediante la red de sensores anclada al *rack* puede realizar una técnica similar a la del *waypoint* con el GPS para trayectorias en interior y predefinidas a la necesidad del proyecto.

2. Metodología

La metodología propuesta para el diseño y desarrollo del proyecto se muestra en la figura 2. La primera cuestión es realizar un análisis de las acciones del sistema, realizar un estudio previo sobre sistemas similares que ya hayan sido desarrollados; obtener las características físicas y mecánicas; y trabajar sobre el modelo matemático del sistema. El siguiente paso es la especificación de requerimientos, en el cual se deben determinar las capacidades, operación y límites del sistema a desarrollar. En cuanto a la selección de componentes, se tiene que evaluar que componentes se necesitarán, su disponibilidad en el mercado, así como costos, o bien si es necesario fabricarlos o adecuar otros componentes. En el desarrollo del sistema, se consta de tres fases, la primera es la construcción física del sistema, la siguiente es la integración de los componentes y finalmente el desarrollo de algoritmos que harán operar al sistema. La última etapa de la metodología consiste en realizar las pruebas de comunicación del sistema, las pruebas de operación, analizar que tanto el sistema puede adaptarse a otras tareas o entornos, y finalmente validar que el funcionamiento del sistema es el adecuado.

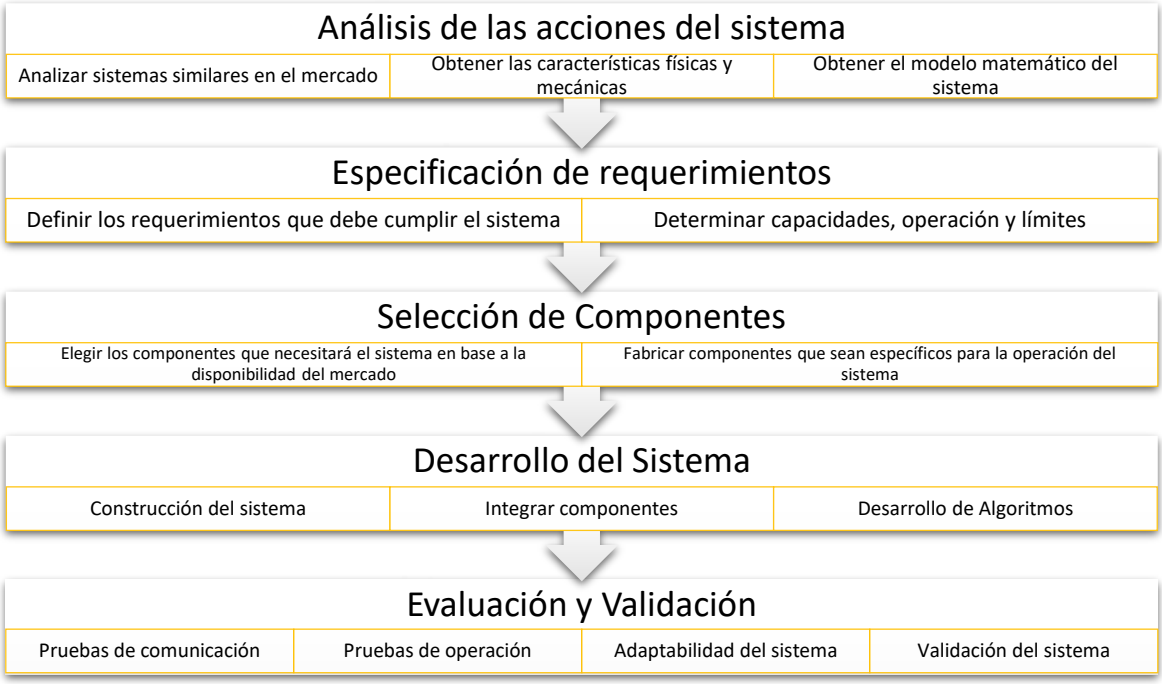


Figura 2. Metodología del proyecto. *Elaboración propia.*

En la actualidad no se dispone de una arquitectura de control completa para un sistema AS/RS que empleé un cuadricóptero el cual, mediante un algoritmo de posicionamiento y trazado de trayectorias, pueda moverse a través de un *rack* de almacenamiento con la ayuda de una red de sensores ultrasónicos, y así disponer de un sistema mecatrónico-logístico adecuado para realizar tareas de control de inventario y de selección de productos al mismo tiempo.

Se va a realizar una propuesta de sistema mecatrónico tipo AS/RS el cual constará de dos sistemas, por una parte, un cuadricóptero con una arquitectura de control RFCSA y, por otra parte, un *rack* de almacenamiento el cual disponga de una computadora que realice todo el procesamiento del sistema. Para realizar la propuesta se realizará el análisis de las principales entidades del sistema, que son el cuadricóptero y el *rack* de almacenamiento, la integración de sus respectivos componentes, sus algoritmos de control (*software*) y sus conexiones físicas con sensores, actuadores y protocolos de comunicación (*hardware*).

2.1. Arquitectura de control del FCS para el cuadricóptero del sistema AS/RS

La arquitectura de control propuesta para el cuadricóptero se observa en la figura 3 en donde describimos al elemento que es el cuadricóptero mediante su arquitectura de control la cual emplea tres protocolos diferentes como lo son el PWM[1], el I2C[2] y la comunicación por el puerto serial. El controlador principal recibe tres señales, la señal del mando RC[3] y del controlador auxiliar por medio de PWM y la señal de la IMU[4] por medio de I2C. El controlador auxiliar se comunica con una red de sensores ópticos por medio del protocolo I2C, mientras que la comunicación a la tarjeta de comunicación inalámbrica y al código QR de inventarios se realizará de forma serial. El controlador auxiliar envía la información en forma de señal PWM de forma directa al controlador principal, esta señal será la misma que indica los pulsos a las señales de *pitch, yaw* y *roll*, por lo cual, el controlador auxiliar puede fungir la misma tarea que realiza el mando RC, pero de forma autónoma.

[1] PWM, son las siglas para el protocolo de comunicación Pulse Wide Modulation
[2] I2C, son las siglas para el protocolo de comunicación Inter-Integrated Circuit
[3] RC, son las siglas de Radio Control
[4] IMU, son las siglas en inglés para Unidad de Medición Inercial

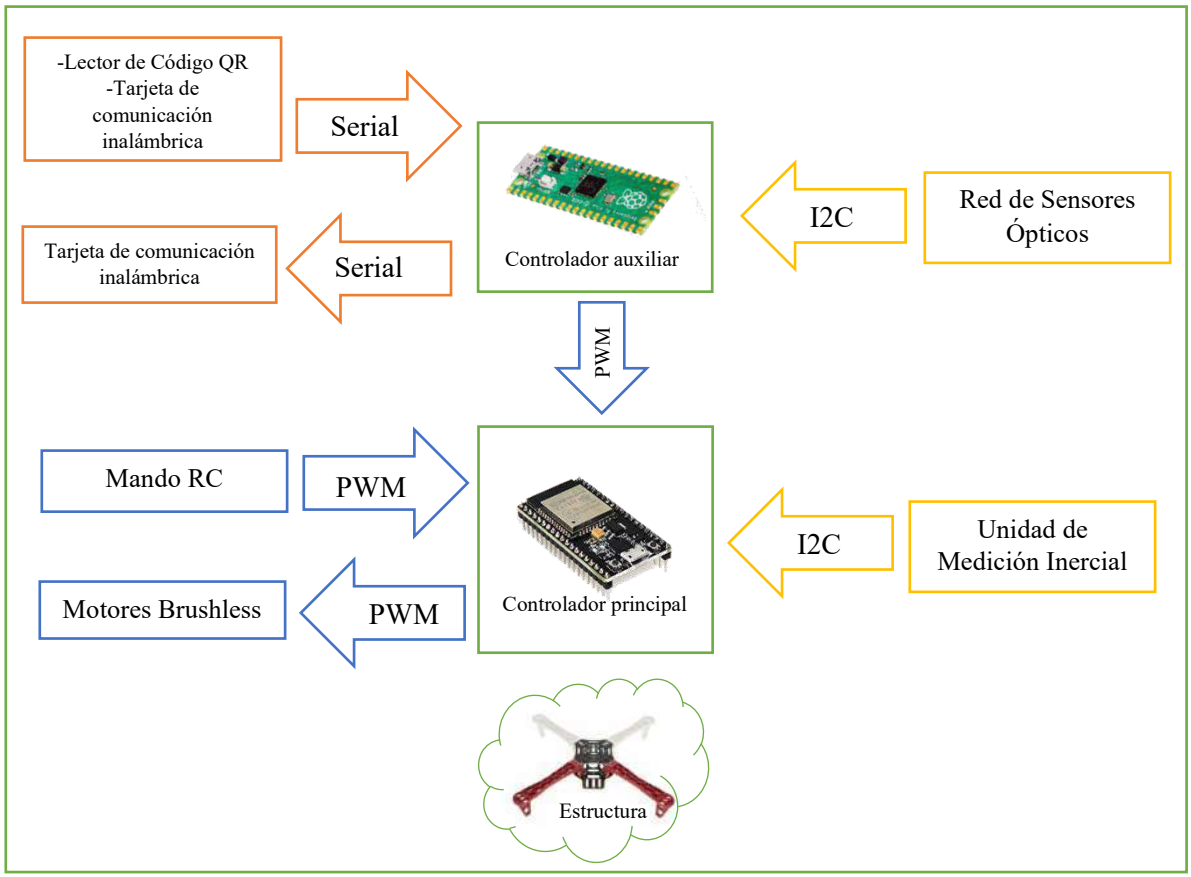


Figura 3. Arquitectura de control de un cuadricóptero para un sistema AS/RS. *Elaboración Propia.*

En cuanto a tareas más específicas de los componentes, el controlador principal del cuadricóptero se comunica con la IMU para determinar la inclinación en *pitch* (rotación lateral), *yaw* (rotación sobre su propio eje) y *roll* (rotación frontal) del cuadricóptero, a la vez, recibirá las señales del mando RC para un control manual en caso de imprevistos en la operación, o bien, del controlador auxiliar, esto por medio de señales PWM, las cuales las coteja a su vez con la IMU en el algoritmo de control y de esta forma enviar la señal PWM adecuada para cada actuador.

Por su parte, el controlador auxiliar recibe las señales de la red de sensores ópticos, mediante el protocolo I2C, a la vez, por el canal serial se comunicará con el lector de códigos QR para el control de inventarios; y con la tarjeta Xbee la cual le enviará las señales procedentes de la red de sensores del *rack*, una vez que realice el procesamiento entre la red de sensores y las señales del *rack*, enviará mediante PWM las cuatro señales de control *pitch, yaw, roll* y *throttle* (potencia de los motores) al controlador del cuadricóptero.

Se planea disponer de seis sensores ópticos para medición de distancia, se necesitan seis debido a que se requiere monitorear las distancias a los 4 lados del cuadricóptero (norte, sur, este, oeste), así como la parte superior y posterior del cuadricóptero, en sí, se puede denominar la funcionalidad de esta red con la misma analogía que fungen los sensores de final de carrera en un robot prismático.

Se puede observar en la figura 4 un diagrama de flujo el cual marca la pauta para realizar la programación y lógica de control del sistema, los principales sensores del sistema son la red de sensores ópticos y ultrasónicos (estos últimos fijados en la estructura del *rack*), así como la IMU del cuadricóptero y del mando RC; la IMU y el mando RC controlan la sustentación del cuadricóptero,

mientras que la planificación de trayectoria se realiza conforme a las necesidades de la selección de artículos, la red de sensores ultrasónicos válida la posición del cuadricóptero con respecto al *rack* y actualiza la información actual del sistema. Se planea colocar al cuadricóptero en un área de ascenso en la que pueda estar lo más plano posible, sea detectado por la red de sensores ultrasónicos de la estructura, y de ahí permitir que empiece con su rutina de posicionamiento.

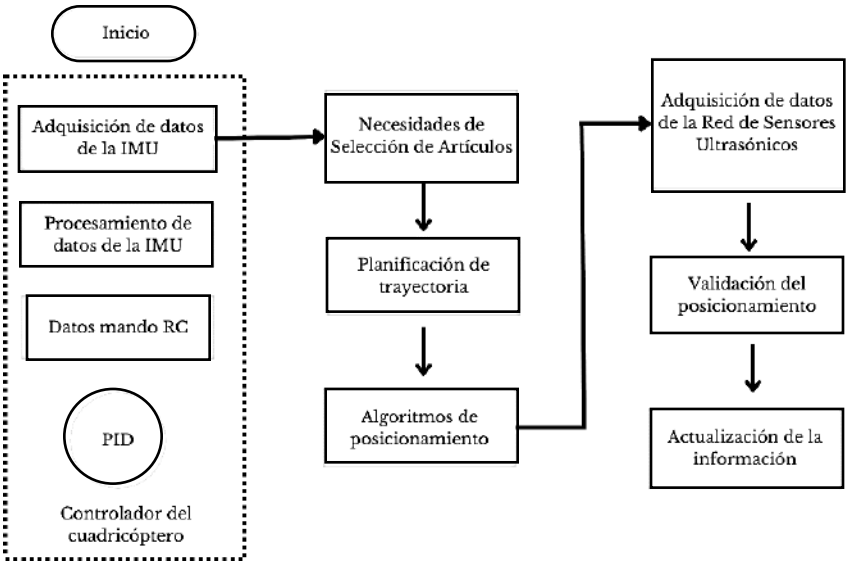


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso del sistema AS/RS. *Elaboración Propia.*

Se ha optado por adaptar la cinemática de robots manipuladores, pero anclada a un robot móvil como lo es un cuadricóptero, si bien esta técnica puede visualizarse como osada e inexacta, se convierte en un desafío matemático y permite que las ecuaciones propias de la robótica móvil para cuadricópteros sean más sencillas de entender. En cuanto a la analogía, como se puede observar en la figura 5, la señal de potencia *throttle* puede verse como una traslación en el eje z, donde d_i sería la altura que pueda alcanzar el cuadricóptero, incluye tanto el movimiento de descenso que podría verse como un $-d_i$, la rotación sobre su propio eje (*yaw*) es una rotación sobre el eje z, la rotación lateral (*roll*) se puede ver como una rotación en el eje x, y la rotación frontal (*pitch*) es producto de multiplicar rotaciones en el eje x y z.

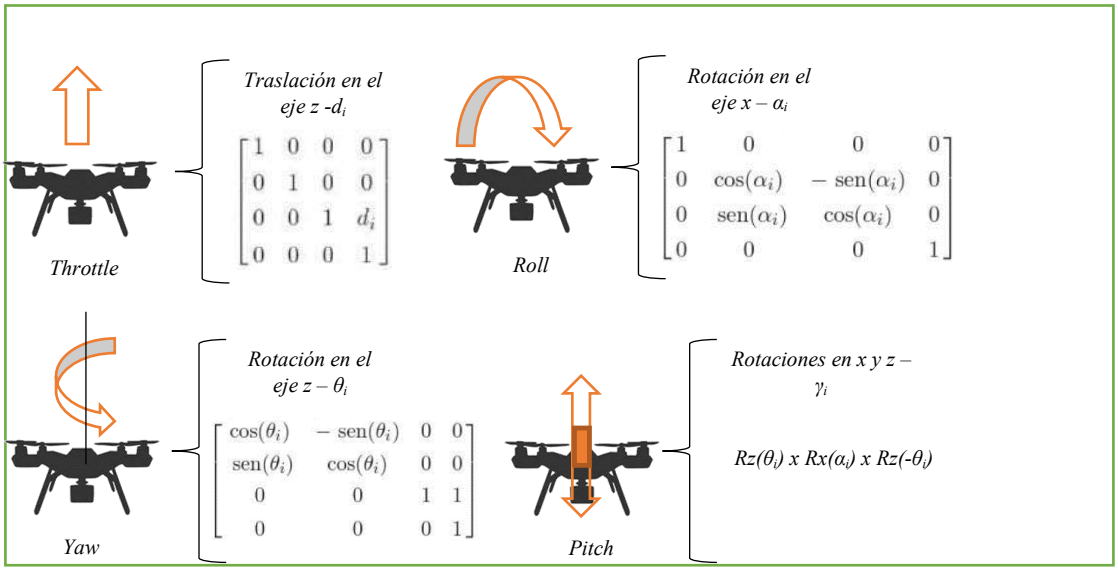


Figura 5. Movimientos de un cuadricóptero en el Algoritmo Denavit-Hartenberg

La trayectoria del cuadricóptero consta en ascender frente al *rack*, detenerse hasta la fila donde debe posicionarse el cuadricóptero, y de ahí moverse lateralmente a la derecha hasta la columna donde se encuentra el sensor, una vez que complete la tarea, se realizarán los mismos movimientos, pero ahora en sentido inverso, se realizará el movimiento lateral hacía la izquierda y después descenderá de forma vertical, estos movimientos se pueden observar en la figura 6. La red de sensores irá validando el movimiento del cuadricóptero, y una vez haya llegado a posicionarse enfrente del respectivo sensor, realizará el movimiento de regreso, aunque en la figura 6 las flechas son rectas, se debe entender que el movimiento natural del cuadricóptero no siempre es lo más recto posible, de tal manera que las señales *throttle* y *roll* son las que dirigen la trayectoria mientras que las señales de *pitch* y *yaw* son auxiliares en el posicionamiento y orientación del cuadricóptero.

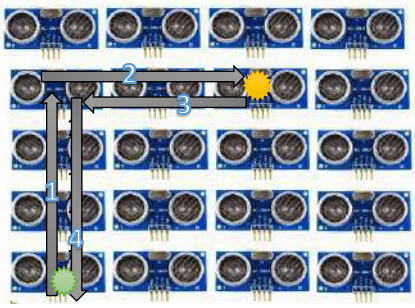


Figura 6. Trayectoria del cuadricóptero. *Elaboración propia.*

La finalidad de los sensores ultrasónicos es la de captar al cuadricóptero, permite que el *rack* pueda conocer la posición exacta del cuadricóptero frente a su propia estructura, sin esta red, no se podría confiar exclusivamente, por citar un ejemplo, en la IMU del cuadricóptero, un *offset*[5] de posición y una cámara que pueda detectar los niveles del *rack*, se necesitaría una IMU con una precisión exacta para evitar variaciones y que el cuadricóptero pueda chocar con la estructura. Al colocar la red de sensores ultrasónicos, se refuerza al sistema, se tiene certeza de la posición del cuadricóptero, se evitan colisiones, es más sencillo para una cámara reconocer un sensor ultrasónico a un nivel de un *rack*, además de que la misma red permite al sistema detectar existencias de producto. Inclusive si el cuadricóptero llegara a perder el rumbo de su trayectoria, los sensores permitirían reorientar al cuadricóptero o detener el proceso para mayor seguridad.

Como se comentó previamente, en el cuadricóptero se incorporarán de la misma forma seis sensores ópticos láser, los cuales fungen la misma funcionalidad que los sensores de final de carrera para los robots prismáticos; además, estos sensores le indicarán al cuadricóptero cuando debe detenerse para evitar colisiones con la estructura, techo o paredes, así como validar cuando el cuadricóptero esté cerca del suelo y así evitar un descenso brusco. De la misma forma, si alguna persona u objeto llegan a invadir el espacio de trabajo, estos sensores permiten lanzar una alarma y descender al cuadricóptero para evitar accidentes. Cabe mencionar que, se ha optado por los sensores ópticos debido a que sus ondas no afectan a las ondas de sonido del sensor ultrasónico, de la misma forma, en la red ultrasónica no van a estar funcionando todos los sensores al mismo tiempo, sino que se realizará la activación sensor a sensor para evitar que las ondas de uno puedan chocar con las de otro, el intervalo de funcionamiento de cada sensor dependerá de la rapidez de la tarjeta y la programación.

2.2 Arquitectura de control del *rack* dinámico de almacenamiento

El control del sistema AS/RS es estrechamente dependiente a una red de sensores ultrasónicos, cuya ventaja frente a las cámaras (que son ampliamente utilizadas para guiar UAV's) consiste en no recibir afectaciones frente variaciones de luz debido a que el fenómeno físico que utiliza es el del sonido.

[5] *Offset, es una referencia, un punto fijo de inicio.*

El sistema se valdrá de una computadora la cual permita realizar el procesamiento adecuado de señales de la red de sensores ultrasónicos con la información proveniente del UAV, y de esta manera enviar las señales adecuadas para el controlador de modo automático del UAV por medio de la tarjera de comunicación inalámbrica; la arquitectura de control del *rack* dinámico de almacenamiento se puede observar en la figura 7; como tal las entradas serían una botonera que permita encender el sistema, y a la vez tener un paro de emergencia ante un imprevisto, la torreta es el indicador visual y auditivo, debido a que la operación del cuadricóptero puede llegar a ser peligrosa para el humano y los artículos en el *rack*. También se incorpora la interfaz de usuario del sistema, la cual permite el monitoreo del sistema de una forma más sencilla.

Si bien la arquitectura de control es sencilla para el *rack* de almacenamiento, debe hacerse hincapié en que el *rack* contiene la aportación más grande del proyecto, que es la red de sensores ultrasónicos, porque la configuración y disposición que esta tenga permitirá darle al *rack* una "inteligencia" de guiar y posicionar al cuadricóptero conforme las mismas necesidades del *rack* lo determinen. Con este enfoque, ahora el *rack* de almacenamiento deja de ser un elemento pasivo en la operación y se convierte en un elemento activo, y no solo termina siendo dependiente del cuadricóptero; sino que, con esta red de sensores ultrasónicos, junto a la computadora, permite que el mismo *rack* sea una arquitectura de control reconfigurable, disponible para interactuar con otros elementos que no necesariamente sean cuadricópteros.

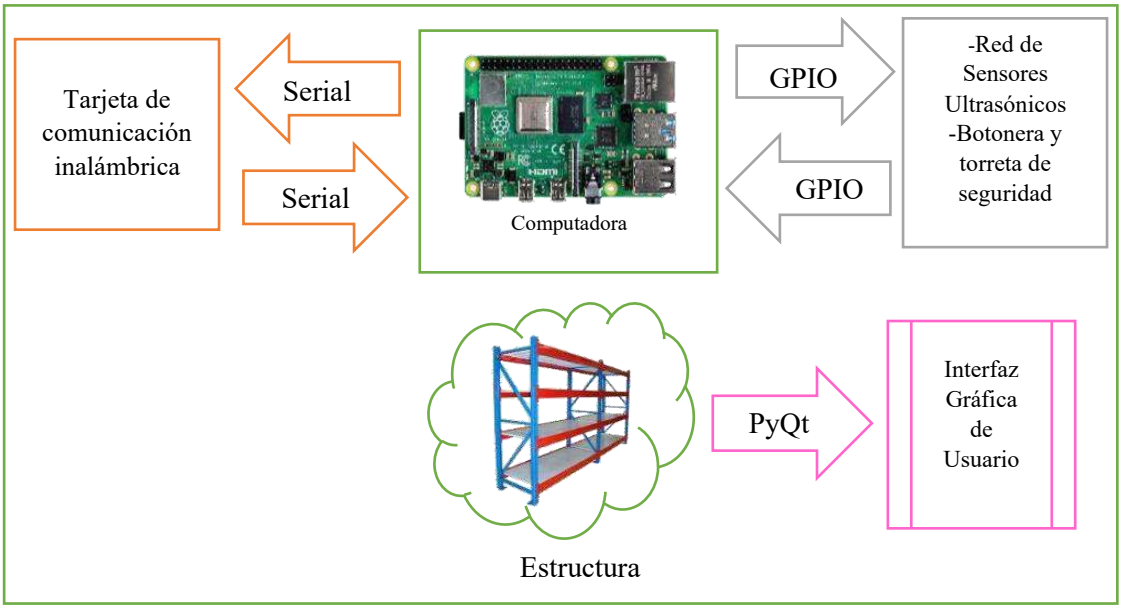


Figura 7. Arquitectura de control del *rack* dinámico de almacenamiento. *Elaboración propia*.

2.3 Topología de Red

Tomando como base la arquitectura de comunicación propuesta por Corteggiano et al [15], se hará una propuesta del sistema AS/RS mediante cuadricóptero enfocada en arquitectura de comunicación para entender de una manera más "computacional" al sistema. La topología de red es un concepto más ligado a la parte computacional; sin embargo, por el tipo de componentes que se están utilizando, estos pueden considerarse como elementos computacionales. La figura 8 nos muestra la topología de red del sistema.

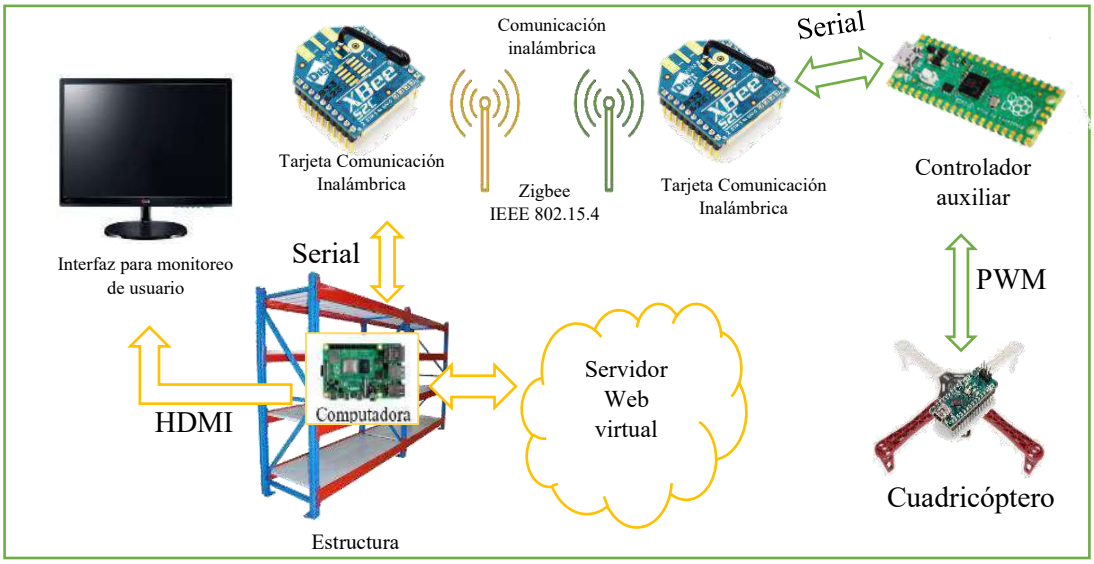


Figura 8. Arquitectura de comunicación propuesta para el sistema AS/RS. *Elaboración propia.*

Como se puede observar en la figura 8, se cuenta con los dos componentes principales del sistema AS/RS, el *rack* contará con una computadora la cual, mediante un cable HDMI se conectará a un monitor para mostrar las variables de interés al usuario, así como la posición del cuadricóptero. La computadora vaciará a un servidor web en la nube toda la información recopilada por el lector QR del cuadricóptero; a su vez, se comunica por el protocolo serial hacía la tarjeta de comunicación inalámbrica, esta a su vez envía la información por el protocolo *Zigbee*, basado en el estándar IEEE 802.15.4. Una vez que la información ha llegado a la tarjeta de comunicación inalámbrica en el cuadricóptero, esta se comunica con el controlador del modo automático del cuadricóptero, y cotejando con la red de sensores ópticos le enviará la información de las cuatro variables de control *pitch, yaw, roll* y *throttle* al cuadricóptero reemplazando la información que de forma manual enviaba el mando RC.

3. Resultados

Se han realizado movimientos de trayectorias en MATLAB para el cuadricóptero utilizando el algoritmo Denavit-Hartenberg, si bien la combinación de algoritmos para robots manipuladores con robots móviles puede llegar a ser difícil; una vez que se planean adecuadamente los movimientos, la planificación de la trayectoria se vuelve más sencilla de bosquejar, y así se pueden multiplicar las matrices en el orden correcto. En la figura 9 se pueden observar los movimientos del cuadricóptero en armonía para realizar una trayectoria, para realizar esta simulación se utilizó el algoritmo Denavit-Hartenberg, para un movimiento libre de cuadricóptero, utilizar y adaptar este algoritmo se puede volver complejo; sin embargo, si se tienen ya planeados los movimientos, permiten que la trayectoria simplemente dependa de los valores de los ángulos de Euler y de la potencia de los motores. Los resultados de la simulación se pueden observar en [18].

El cuadricóptero diseñado se puede observar en la figura 10, el *frame* está hecho de acrílico, debido a que es un material liviano y de bajo costo, se ha utilizado la configuración en X, debido a su popularidad y desarrollo. La distancia de motor a motor es de 50cm., se han utilizado motores de 2200 KV[6]; los variadores de frecuencia son a 40 Amperes. La IMU se ha colocado en el *frame* del

[6] KV es la constante de velocidad por voltio, o bien, revoluciones por minuto por cada volt suministrado, no debe confundirse con el kilovoltio.

cuadricóptero, sobre una capa gruesa de foami para disminuir las vibraciones. Se han dispuesto clemas para asegurar que las conexiones sean seguras y no se desconecten durante la operación. De la misma forma se cuenta con leds que permitirán conocer el estado del cuadricóptero, si está operativo, si se ha quedado sin batería o si está detenido. En la figura 10 se pueden observar dos niveles de circuitería, en el primer nivel está colocado el controlador principal, mientras que el segundo nivel se ha dejado para el controlador auxiliar y los sensores ópticos.

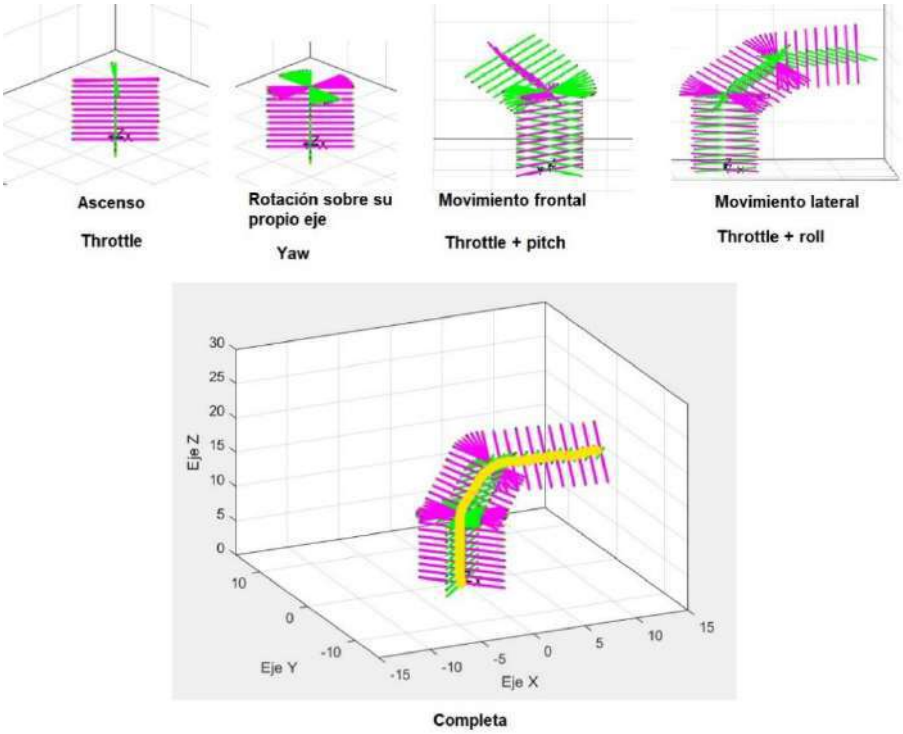


Figura 9. Trayectoria del cuadricóptero. ***Elaboración propia.***

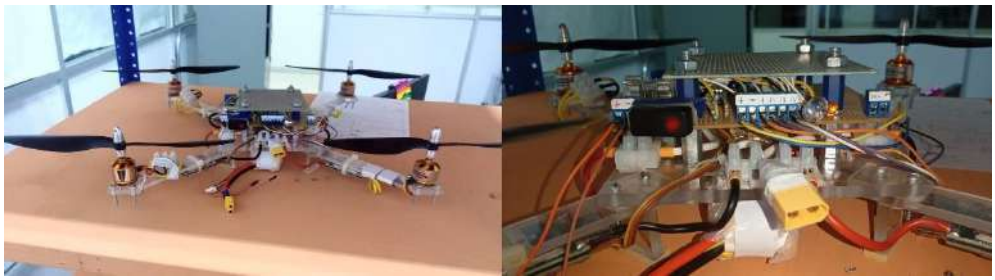


Figura 10. Cuadricóptero del sistema. ***Elaboración propia.***

Para el control del cuadricóptero, se utilizó el clásico PID con la IMU para la sustentación y navegabilidad del cuadricóptero, en la figura 11 se puede observar la respuesta del controlador ante una perturbación frontal en el cuadricóptero, cada señal representa uno de los cuatro motores, se puede ver como la señal en los dos motores frontales decrece mientras que en los motores traseros aumenta para contrarrestar la perturbación que se introducido al sistema. Los resultados de este controlador y su respuesta frente a las variaciones se pueden consultar en [19].

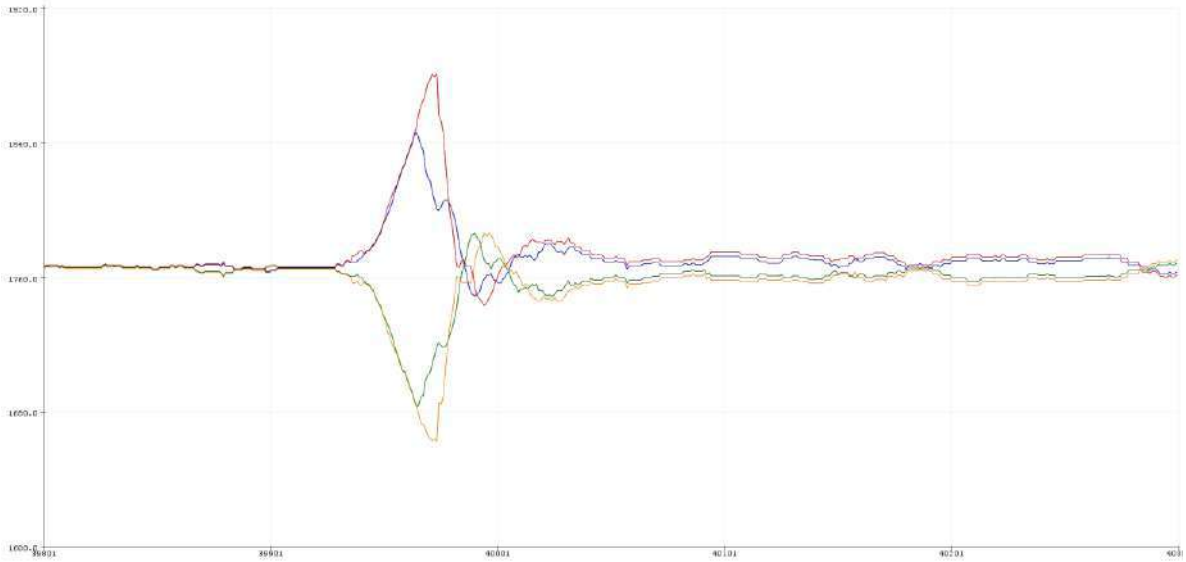


Figura 11. Señal de control del cuadricóptero. *Elaboración propia.*

En cuanto al desarrollo del *rack*, este se puede visualizar en la figura 12, se ha armado la estructura, y se han empezado a diseñar los soportes para los sensores ultrasónicos, cada estante tiene una separación de 28 cm., se han dejado los espacios para colocar hasta tres secciones por cada nivel de estantería. Se han anclado también una botonera de seguridad y alarmas visuales y auditivas, esto para prevención de riesgos por la operación del cuadricóptero. Se puede observar en la figura 12 los soportes para sensores ultrasónicos, el sensor ultrasónico más comercial dispone de tornillos M2 para su anclaje, por lo cual resulta más practico anclarlo mediante las bocinas, el soporte es el que se anclará con tornillos a la estructura, se puede observar también la disposición de los sensores para guiar al cuadricóptero a través de la estructura. De la misma forma, internamente también se contará con una red de sensores ultrasónicos que pueda informar al sistema en que secciones se requiere el posicionamiento del cuadricóptero.

Al ocupar un *rack* de tamaño robusto, permite que este pueda almacenar artículos de mayor peso y dimensiones, de la misma forma, el mismo modelo de *rack* permite una ampliación modular de la estructura, la disposición física de los elementos permite a la vez que el sistema pueda adaptarse a modelos de *rack* más pequeños o más grandes en una tolerancia que no afecté la trayectoria del cuadricóptero, por lo cual, el aporte tecnológico es el sistema en sí, mientras que el rack es solo la plataforma a la que este puede adaptarse.

Figura 12. Rack del Sistema. *Elaboración propia.*

En cuanto a la captación de los sensores ultrasónicos, estos si logran detectar la estructura del cuadricóptero en distancias menores a un metro, distancias en las cuales el cuadricóptero operara en la estructura, la captación de la proximidad del cuadricóptero se puede observar en [20].

De la misma forma, la interfaz gráfica del sistema trabaja adecuadamente permitiendo la captación de los sensores ultrasónicos, y mostrando las señales de salida del cuadricóptero en pantalla, es una plataforma adecuada para el monitoreo del sistema y permite que el *rack* sea una estructura activa en la operación del sistema. El funcionamiento de la interfaz gráfica se puede observar en [21].

3. Conclusiones

Si bien ya se han desarrollado algunos sistemas tipo AS/RS con UAV's, no se dispone de una arquitectura de control que involucre a la estructura de almacenamiento con el UAV directamente en comunicación, muchos desarrollos han apostado por los sistemas de visión computarizada los cuales presentan problemáticas ante variaciones de luz o en medición de longitudes, por lo cual se propone un sistema AS/RS el cual mediante una red de sensores ópticos y ultrasónicos permita guiar al cuadricóptero por la estructura de almacenamiento, realizando la tarea principal de control de inventarios y la tarea del posicionamiento que es la base de la selección de artículos. Esto no significa que las redes de sensores están por encima de los sistemas de visión artificial, o viceversa, sino que ambos elementos pueden auxiliarse mutuamente para tener un sistema de posicionamiento más eficiente.

La ventaja de una RFCSA (Arquitectura Reconfigurable de Sistema de Control de Vuelo) es que permite que el cuadricóptero pueda reconfigurarse para realizar otras tareas, independientemente de la tarea de almacenamiento, por lo cual permite ampliar la arquitectura hacía otras áreas y tareas, y no limitar al cuadricóptero a una exclusividad limitante de operación. El cuadricóptero que se está desarrollando cumple con esta función, debido a que su uso no se limita a su funcionalidad en el sistema, sino que contiene la plataforma para desarrollar otras tareas adicionales inclusive en otro entorno.

Un FCS (Sistema de Control de Vuelo) es un sistema que lee la información de una amplia variedad de sensores, realiza el control mediante un controlador embebido y dirige las señales hacía los rotores del UAV, aunque la idea de un FCS parece muy simplificada, puede ampliarse de acuerdo a las necesidades del proyecto, la tarea de este texto es la de automatizar el cuadricóptero mediante una red de sensores ópticos y ultrasónicos, y una IMU, además de la conexión de otros periféricos necesarios para la operación.

Ya existe desarrollo en cuanto a algoritmos para la adquisición de datos de redes de sensores para UAV's, y aunque la mayoría están dedicados para UAV's al exterior, se pueden realizar adecuaciones en el algoritmo para adecuarlo a las tareas en interior de los sistemas AS/RS, así como su incorporación con metodologías de control clásico, como el controlador PID. Aunque la tarea de posicionamiento en interiores puede parecer más sencilla, puede resultar igual de compleja que la navegación al exterior. En este caso particular, la red de sensores validará el posicionamiento autónomo del cuadricóptero, debido a que se trabaja con una trayectoria predefinida.

Aún falta desarrollo en *racks* automatizados, si bien es una idea en la cual la industria logística no ha decidido ahondar de forma exhaustiva, estos pueden ser auxiliares ideales en la visión de la *industria 4.0* donde, por su versatilidad, permitirían el anclaje de carga, selección de mercancía y control de inventarios de una forma más rápida y sencilla, una arquitectura de control también puede ser aplicada a un *rack* de almacenamiento de forma que permita automatizar el sistema y participar activamente en la tarea de posicionamiento.

A pesar de que el concepto de "arquitectura de control", está estrechamente relacionado con el concepto de "topología de red", esto no significa que los sensores y actuadores no utilicen

diferentes protocolos como el PWM, I2C o Serial para realizar el envío de información. El *rack* se comunicará con el UAV mediante el protocolo Zigbee basado en IEEE 802.15.4, esta comunicación bidireccional permitirá que cada uno de los dispositivos pueda cotejar el estado del otro y sus variables de interés, para así iniciar los algoritmos y metodologías de control para realizar las tareas determinadas.

El proceso como tal, por su complejidad y versatilidad, dispone de su aplicación con otras técnicas de mejora continua que permitan al sistema AS/RS o a sus componentes, optimizar y perfeccionar sus arquitecturas de control, así como los modelos matemáticos que disponen con el objetivo de tener un sistema fortalecido en la tarea de automatización.

Es interesante combinar algunos algoritmos como el de Denavit-Hartenberg con la robótica móvil, ya que, si bien no es lo deseado y se puede perder exactitud, cuando se utiliza una trayectoria ya planificada, resulta que es más sencillo realizar la multiplicación de todas las matrices y sustituir los valores de potencia e inclinación en cada uno de los movimientos.

Referencias

[1] D. Berthiaume, «Walmart flew over 6,000 successful drone deliveries in 2022,» 5 Enero 2023. [En línea]. Available: https://chainstoreage.com/walmart-flew-over-6000-successful-drone-deliveries-2022.

[2] H. Cueto, «Amazon inicia pruebas de entrega de paquetes con drones en California y Texas,» 28 Diciembre 2022. [En línea]. Available: https://businessinsider.mx/amazon-inicia-pruebas-entrega-paquetes-drones-california-texas_tecnologia/.

[3] E. Romaine, «Automated Storage & Retrieval System (AS/RS) Types & Uses,» 18 Agosto 2020. [En línea]. Available: https://www.conveyco.com/blog/automated-storage-and-retrieval-types/.

[4] Ractem, «Ractem. Líderes europeos en estanterías.,» ¿QUÉ ES RACK EN LOGÍSTICA?, 17 Febrero 2022. [En línea]. Available: https://www.ractem.es/blog/es-rack-logistica. [Último acceso: 1 Septiembre 2023].

[5] B. Heater, «Corvus is using drones to track warehouse inventory,» 16 Junio 2022. [En línea]. Available: https://techcrunch.com/2022/06/16/corvus-is-using-drones-to-track-warehouse-inventory/.

[6] M. Smith, «Crocs 'midair shoe store' is staffed by drones,» 5 Marzo 2015. [En línea]. Available: https://www.engadget.com/2015-03-05-crocs-midair-shoe-store-drones.html.

[7] manutención&almacenaje.com, «Dron Flybox para inventario de Linde MH, controlado y alimentado por L-Matic,» 9 Abril 2017. [En línea]. Available: https://www.manutencionyalmacenaje.com/Articulos/238891-Dron-Flybox-para-inventario-de-Linde-MH-controlado-y-alimentado-por-L-Matic.html.

[8] Corvus Robotics, «Corvus Warehouse Inventory Drone,» 2023. [En línea]. Available: https://www.corvus-robotics.com/corvus-one.

[9] J. A. García Barroso, «Automatización de un Proceso Industrial 7 (Caso Práctico-Arquitectura de Control),» 15 Abril 2015. [En línea]. Available: https://www.noeju.com/automatizacion-de-un-proceso-industrial-7-caso-practico-arquitectura-de-control/.

[10] Z. Deng, C. Ma y M. Zhu, *A reconfigurable flight control system architecture for Small Unmanned Aerial Vehicles,* Vancouver, British Columbia: IEEE, 2012.

[11] E. Pastor, J. López y P. Royo, *A Hardware/Software Architecture for UAV Payload and Mission Control,* Portland, Oregon: IEEE, 2006.

[12] F. Jia y Y. Song, «UAV Automation Control System Based on an Intelligent Sensor Network,» *Hindawi: Journal of Sensors, Vol. 2022,* 2022.

[13] B. M. Lara Sosa, E. Y. Fagua Pérez, J. Mauricio Salamanca y O. I. Higuera Martinez, «Diseño e implementación de un sistema de control de vuelo para un vehículo aéreo no tripulado tipo cuadricóptero,» *Tecnura. Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento.,* 2017.

[14] M. Hazas y A. Hopper, «Broadband Ultrasonic Location Systems for Improved Indoor Positioning,» *IEEE Transactions on Mobile Computing. Vol. 5,* 2006.

[15] F. Corteggiano, S. Tosco, C. Benegas y L. Maglione, «Arquitectura de comunicación para sistemas de teleoperación de UAV sobre internet,» *Mecánica Computacional Vol XXXIV,* pp. 3473-3480, 2016.

[16] R. Dargham, A. Sayouti y H. Medromi, «Multi-agent control architecture for autonomy optimization applied to hexacopter,» de *5th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, Marrakech, Morocco, 2016.

[17] E. Capello, G. Guglieri y F. Quagliotti, «A Waypoint-Based Guidance Algorithm for mini UAVs,» de *2nd IFAC Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems*, Compiegne, France, 2013.

[18] A. R. Mendoza Vázquez, «Simulación Cinemática Cuadricóptero en MATLAB,» YouTube, 29 Septiembre 2023. [En línea]. Available: https://youtu.be/Sr-YJbL85Ag.

[19] A. R. Mendoza Vázquez, «Respuesta PID de un cuadricóptero,» Youtube, 28 Septiembre 2023. [En línea]. Available: https://youtu.be/NgFNxuOGHPY.

[20] A. R. Mendoza Vázquez, «Captación de posición de cuadricóptero mediante una red de sensores ultrasónicos,» YouTube, 28 Septiembre 2023. [En línea]. Available: https://youtu.be/cFUJqwC6VqU.

[21] A. R. Mendoza Vázquez, «Plataforma de Interfaz Gráfica para Monitoreo de un Sistema AS/RS con cuadricóptero,» YouTube, 28 Septiembre 2023. [En línea]. Available: https://youtu.be/bOt3VODrQGs.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 10, pp. 114 – 128
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Diseño mecánico de un robot móvil para aplicaciones de pick and place.

Rasgado Blas Carlos, Mendoza Vázquez José Rafael, Rojas Cuevas Irma Delia y Torres Méndez Sergio Javier

Tecnm/Instituto Tecnológico de Puebla. Av. Tecnológico 420 Col. Maravillas. C.P. 72220
[1] División de estudios de posgrado e investigación. Maestría de Ingeniería Electrónica. [2] Departamento de Eléctrica y Electrónica. [3] departamento de Ingenierías [4]. Departamento de metal

Resumen

En este documento se presenta el diseño de un prototipo de un robot móvil con dos ruedas de dirección motorizadas y cuatro ruedas de estabilidad que permiten el balance del vehículo móvil. El robot móvil tiene aplicación en el área de logística para actividades de pick and place. El robot tiene dos partes, la primera está diseñada para el desplazamiento del robot empleando locomoción por medio de ruedas con dos grados de libertad y la segunda parte comprende el sistema de elevación y colocación de material, que tiene 2 grados de libertad. Se presenta la selección de los materiales y actuadores para su diseño mecánico. También, se presenta el análisis de sus componentes a nivel estructural o de rendimiento. Se presenta la integración de las dos secciones y simulaciones de sus movimientos de acuerdo con los requerimientos que se ha definido. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones.

Palabras clave: Diseño, robot móvil, pick and place

1. Introducción

En la actualidad las áreas y aplicaciones donde se desenvuelven los robots móviles son muy variadas, desde los más comunes como son el hogar con robot de limpieza, pasando por áreas como hospitales monitoreando los signos vitales de los pacientes o en almacenes logísticos realizando aplicaciones de pick and place hasta los robots de exploración espacial. La idea de desarrollar un robot móvil con aplicaciones de pick and place abre un abanico de posibles aplicaciones para el desarrollo de prototipos de este tipo de sistemas robóticos. El desarrollo de robot móviles con aplicaciones de pick and place equipados con sensores de detección de puntos o para la evasión de obstáculos, así como radares para el mapeo de áreas implica la integración de diferentes microcontroladores para su control.

Utilizando un enfoque mecatrónico completo se desarrolla el diseño de un robot móvil que pueda desplazarse en cualquier posición del plano real que pueda tomar y colocar material en algún punto indicado e implementando sistemas de percepción del medio para su desplazamiento correcto.

Se requiere realizar el prototipo de un robot móvil con aplicaciones de pick and place, el cual debe contar con un rack de recolección de tres niveles que funcione como un tipo buffer de carga que almacene de manera momentánea los materiales a transportar para su posterior distribución, cada nivel debe soportar una carga de 2 Kg. El robot móvil tendrá una capacidad de carga máxima de 8 Kg distribuida en el buffer de carga y sobre la mesa de elevación y posicionamiento en caso de ser requerido. Se debe considerar equipos con buena eficiencia energética de tal manera que se pueda aportar cierto tiempo de autonomía energética, además de la capacidad de desplazarse en cualquier posición del plano real evadiendo obstáculos y orientándose mediante un sistema de localización y visión. El diseño del robot móvil está enfocado en almacenes o centros logísticos con superficie plana de concreto pulido que permita su desplazamiento en el interior de las instalaciones.

2. Metodología

Para el desarrollo del prototipo del robot móvil, se aplicó el concepto de teoría de sistemas como metodología, dividiendo en subsistemas el sistema robótico, de modo que se dividió al sistema en dos partes: la parte de locomoción y la de elevación y posicionamiento del material.

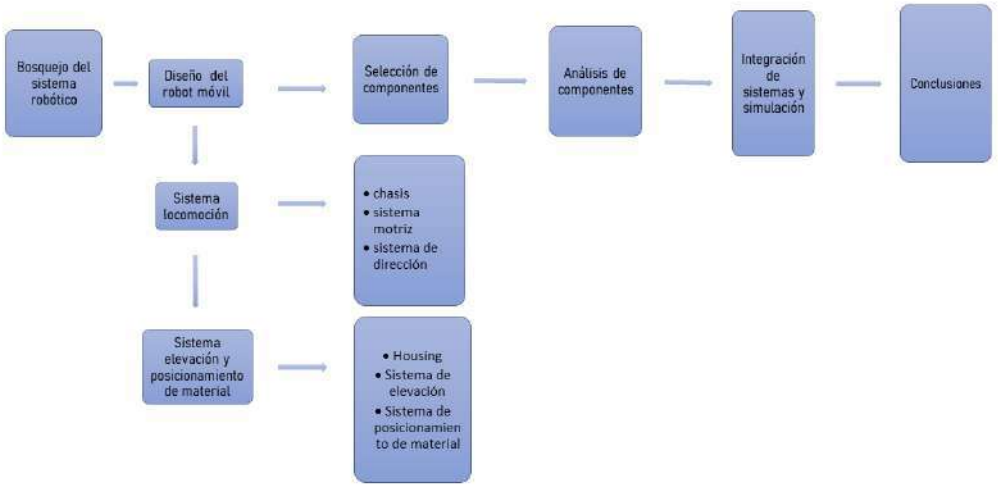


Figura 1. Muestra el diagrama Metodológico

3. Morfología del robot móvil

Un robot móvil se define como un sistema electromecánico capaz de desplazarse de manera autónoma sin estar sujeto físicamente a un solo punto. Posee sensores que permiten monitorear a cada momento su posición relativa a su punto de origen y a su punto de destino. Su desplazamiento es proporcionado mediante dispositivos de locomoción, tales como ruedas, patas, orugas en el caso de los robots móviles terrestres.

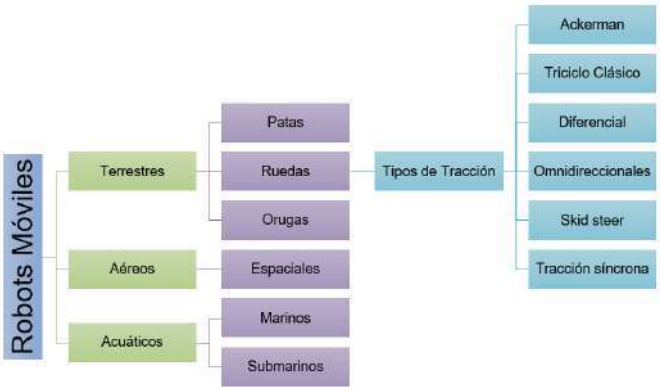


Figura 2. Muestra las diferentes configuraciones de los robots móviles.

La figura 2. Nos permite definir la configuración de ruedas del robot móvil que pretendemos diseñar. Para nuestro caso de estudio y diseño se definió que será un robot diferencial. Para darle un mayor soporte y estabilidad se consideran 4 ruedas tipos caster. Obteniendo la configuración mostrada en la figura 3.

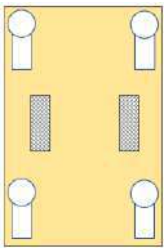


Figura 3. Representación del sistema de locomoción (dos ruedas de dirección motorizadas y cuatro ruedas de estabilidad tipo caster)

Se denominan robots cartesianos aquellos que se desplazan paralelos a los ejes X, Y, Z, también son conocidos como robots lineales. Este tipo de robots son útiles para aplicaciones de corte, plotters, impresoras 3d, etc.

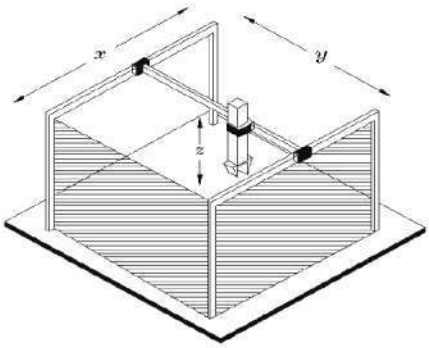


Figura 4. Muestra la representación de un robot cartesiano. Imagen tomada de libro (Reyes Cortés, 2011)

Aunque para nuestro caso de estudio se consideran solo dos ejes de movimientos podemos decir que se trata de un robot cartesiano puesto que sólo se desplazará en el eje z y x. es decir contará sólo con 2 grados de libertad.

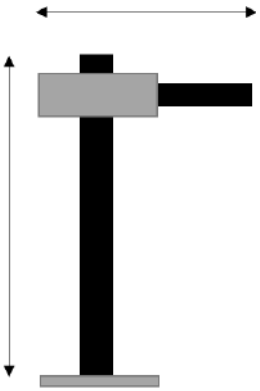


Figura 5. Muestra un sistema con movimiento bidimensional.

4. Preselección de materiales

En esta sección se mostrarán los materiales que fueron seleccionados previo al diseño. Es importante considerar algunos materiales base, algunos factores a considerar en los materiales base son:

- El bajo costo del material.
- Que el proyecto previamente así lo requiera.

- Que sea el material ideal para la aplicación.

Aparte de los tres aspectos antes mencionados, otra consideración para la preselección de materiales que nos ayudan a realizar una proyección del prototipo final. Es decir, nos de una visión de como quedará el prototipo.

4.1 Perfil de aluminio Estructural

El Perfil de aluminio estructural ofrece una completa línea para aplicaciones de bases y diseños de máquinas, protecciones de seguridad y carcasas, estaciones de trabajo, y otras aplicaciones industriales. El perfil de aluminio con ranura en T modular, ofrecen flexibilidad y ahorro de costes en ingeniería, fabricación y montaje. Los diseños estructurales son una solución perfecta para aplicaciones de automatización para fábricas, en embalaje y sistemas de depósito en almacenes.

Figura 6. Muestra algunas aplicaciones del aluminio estructural (PARKER HANNIFIN CORP, 2023)

Dadas las prestaciones mecánicas que ofrece el perfil de aluminio estructural y su bajo costo se decidió usarlo para la fabricación de la mayoría de las estructuras sólidas del sistema robótico.

4.2 Motores

Realizar una adecuada selección del sistema motriz es importante ya que será el medio por el cual el robot móvil se desplazará en su entorno de trabajo. De acuerdo con el requerimiento solicitado y a las características de cada uno de los actuadores se implementaron motores hub para el sistema de tracción, esto por la eficiencia energética que muestran este tipo de motores. El motor hub es un motor brushless tipo autocontenido, algunos fabricantes les denominan de cubo o alojados, en los cuales se puede integrar el motor y colocado alrededor o a un costado, se puede montar la rueda, dando como ventaja, un sistema compacto y con presentación de rueda, esto se observa en la figura 7, donde se ve el interior del motor en el costado derecho y en el izquierdo el motor seleccionado que integra motor y rueda en un solo conjunto.

Además de sus características mecánicas, el modelo seleccionado cuenta con la rueda de tracción acoplada directamente al motor brushless, teniendo entonces una relación de transmisión 1:1 y con ello se evitó la compra de sistemas de transmisión. Para el sistema de dirección se implementa un motor de DC con una eficiencia no superior al brushless, pero útil para el desarrollo del prototipo.

Tabla 1. Características del Hub Motor

Motor	Potencia nominal	Tensión nominal	Par nominal	Corriente nominal	Velocidad nominal
ZLLG65ASM250	150 W	24 V	6.5 N.m	8 A	400 rpm

Figura 7. Hub Motor con su controlador y su estructura interna

Los motores de desplazamiento se calcularon para carga neta de 50kg, considerando lo anterior realizaremos el cálculo de la resistencia a la rodadura sobre concreto con un coeficiente de rodadura (Cr) de 0.0229

$$F_{rodadura} = C_r\, W \qquad (1)$$

$$F_{rodadura} = 0.0229\ x\ 50\ Kg\ x\ 9.81\ \frac{m}{s^2} = 11.2324\ N \qquad (2)$$

$$T_{rodadura} = F_{rodadura}\ x\ radio_de_rueda \qquad (3)$$

$$T_{rodadura} = 11.23245\ \mathrm{N}\ x\ 0.08255\ m = 0.9272\ N.m \qquad (4)$$

$$T_{motor\ desplazamiento} = \frac{T_{rodadura}}{Relación\ de\ engranaje} = \frac{0.927238}{1}\ N.m = 0.927238\ N.m \qquad (5)$$

Dado que la relación de transmisión es 1:1 el Torque de rodadura es igual al torque del motor de desplazamiento.

Para el sistema de elevación y posicionamiento se selecciona un motor a pasos. Los motores paso a paso, también llamados “de movimientos indexado” o simplemente “de pasos”, constituye un caso especial de esta clase de motores, estando diseñados para girar un determinado ángulo en función de las señales eléctricas que les apliquen en sus terminales de control. (Conti, 2005). Las aplicaciones típicas son, entre otras, motores para alimentación de papel de impresoras y máquinas de escribir, posicionamiento de herramientas y soportes en equipos de mecanizado controlados numéricamente, aplicaciones robóticas, etc. (Conti, 2005)

Para el cálculo del torque motor se consideró la elevacion de una masa de 7.45 Kg (constituida por la masa total de la mesa de elevación y posicionamiento más la máxima carga de recoleción de 2 Kg) a través de husillo de bolas de 5mm de paso.

$$\mathrm{T} = \frac{F.l}{2000 * \pi * 0.9} = \frac{73.1590\ N *\ 5mm}{2000 * \pi * 0.9} = 0.0646\ N.m \qquad (6)$$

Donde:

T= Torque del motor de elevación.
F= Fuerza axial producida por masa de elevación
l= Paso del tornillo de bolas.

Las rpm y potencia del motor se obtuvo considerando una velocidad de desplazamiento vertical de 0.05 m/s, por lo tanto:

$$\text{rpm} = \frac{200\,pasos}{seg} x \frac{1\,rev}{2000\,pasos} x\ \frac{60\,seg}{min} = 600\,rpm \quad (7)$$

$$\text{potencia} = \frac{0.0646\,N.m * 2 * \pi * 600\,rpm}{60} = 4.0589\,W \quad (8)$$

Tabla 2 Muestra las características del motor a pasos.

Motor	Potencia nominal	Tensión nominal	Par nominal	Corriente nominal	Velocidad nominal
57HS5630A4	56 W	24 V	1.2 N.m	3 a	1650 rpm

Figura 8. Motor a pasos.

Tabla 3 Muestra la comparativa de las características de los motores a pasos, DC y Brushless. (E. Sandin, 2003)

	Motor a pasos	Motor DC	Wheel servo motor (Brushless)
Costo	Bajo	Medio	Alto
Fluidez	Bajo	Buena a excelente	Buena a excelente
Rango de velocidad	0-1500 rpm	0-6000 rpm	0-10000 rpm
Torque	Alto (con caídas de velocidad)	Medio	alto
Retroalimentación requerida	no	Posición o velocidad	Conmutación y posición o velocidad
mantenimiento	ninguno	si	ninguno
Limpieza	Excelente	Polvo de la escobilla	Excelente
Durabilidad	Alta (Ausencia de fricción)	Media (Fricción de escobillas)	Alta (Ausencia de fricción)

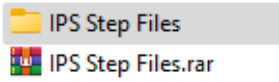
5. Diseño

5.1 Introducción al diseño asistido por computadora.

El software implementado fue SolidWorks, mediante el cual se realizaron y ensamblaron cada una de las piezas del robot móvil.

El diseño de los chasis se realizó tomando como base el aluminio estructural. Previo al diseño se descargaron las librerías de perfil estructural de la página oficial de la marca Parker. Una vez descargados los catálogos, se realizaron los siguientes pasos:

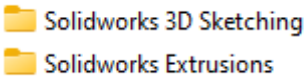
1. Ir a la carpeta de descargas, descomprimimos el archivo rar.



2. Accedemos a la carpeta IPS step Files, donde nos aparecen todos los catálogos de piezas para perfil estructural de aluminio. Accederemos a la carpeta Solidworks Files IPS

01-Extrusion Profiles	16/03/2023 12:26 p. m.	Carpeta de archivos
02-Fasteners	16/03/2023 12:26 p. m.	Carpeta de archivos
03-Brackets_Gussets_Plates	16/03/2023 12:26 p. m.	Carpeta de archivos
04-Panels_Doors	16/03/2023 12:26 p. m.	Carpeta de archivos
05-Handles_Hinges	16/03/2023 12:26 p. m.	Carpeta de archivos
06-Feet_Casters	16/03/2023 12:26 p. m.	Carpeta de archivos
07-Special Applications	16/03/2023 12:26 p. m.	Carpeta de archivos
08-Linear Application	16/03/2023 12:26 p. m.	Carpeta de archivos
DXF Profile End Views	16/03/2023 12:26 p. m.	Carpeta de archivos
Inventor Files	16/03/2023 12:26 p. m.	Carpeta de archivos
Solidworks Files IPS	16/03/2023 12:26 p. m.	Carpeta de archivos

3. Accedemos a la carpeta Solidworks 3D Sketching.



4. Dentro de la carpeta SolidWorks 3D Sketching seleccionamos y copiamos la carpeta IPS Library.

5. Pegamos la carpeta IPS Library en la siguiente dirección:
C:\Program Files\SOLIDWORKS Corp\SOLIDWORKS\lang\spanish\weldment profiles\

6. Con estos pasos ya habremos cargado la librería de Parker a la biblioteca de SolidWorks.

7. Para corroborar lo realizado abrimos SolidWorks y creamos una nueva pieza. En la barra de administrador de comandos seleccionamos el comando piezas soldadas, como se muestra en la Figura 9.

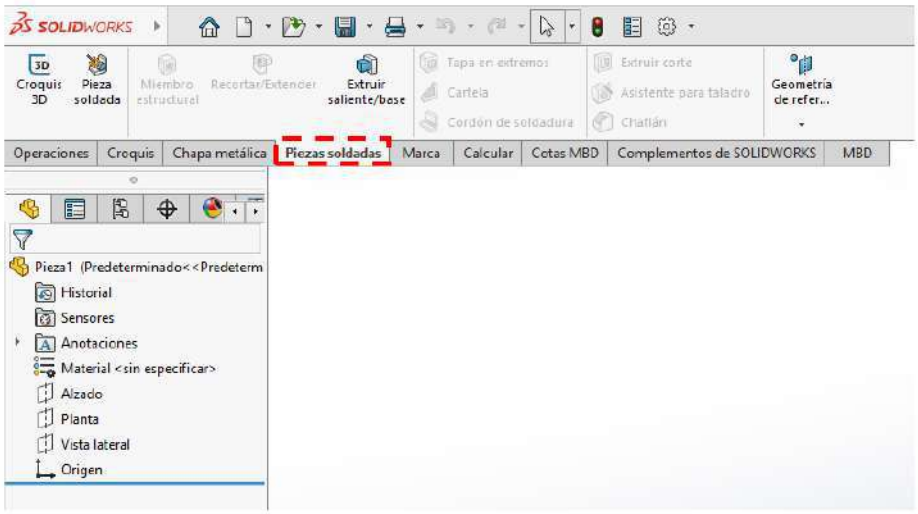


Figura 9. Muestra la selección del comando piezas soldadas.

8. Creamos un coquis 3D, trazamos la estructura a diseñar y la dimensionamos.

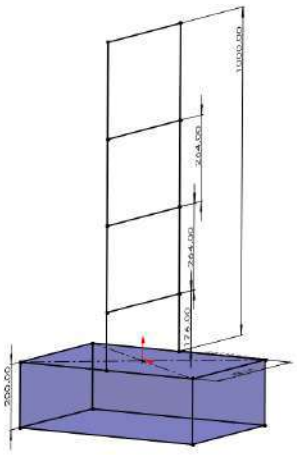


Figura 10. Muestra el diseño del croquis 3D.

9. Seleccionamos el comando pieza soldada y posteriormente el comando Miembro estructural, como se muestran en las figuras 11 y 12.

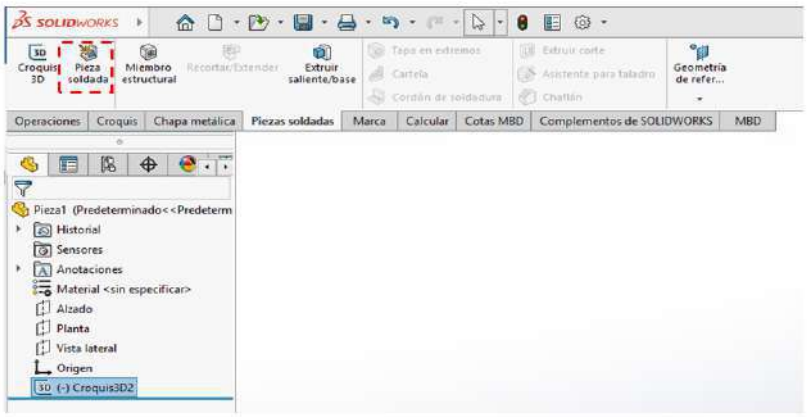


Figura 11. Muestra la selección del comando Pieza soldada.

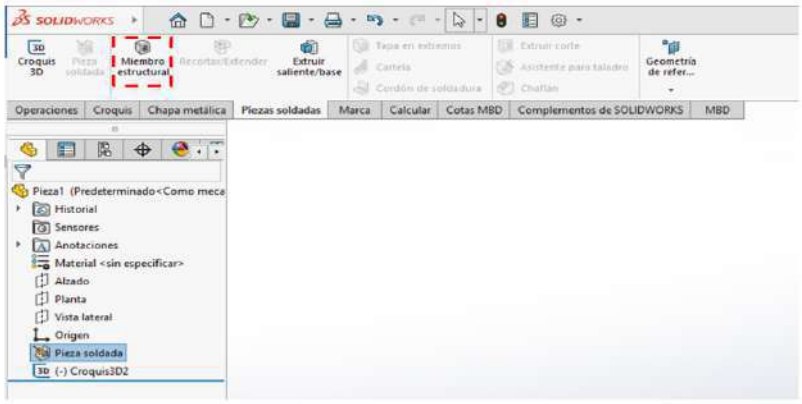


Figura 12. Muestra la selección de comando miembro estructural.

10. Dentro del comando Miembro estructural se presentan diferentes campos el primer campo hace referencia a la librería recién ingresada IPS Library. El segundo campo es el tipo de elemento a cargar y por último el modelo del elemento a cargar.

Figura 13. Muestra las opciones del comando Miembro estructural.

11. Al terminar de seleccionar el modelo del perfil. Seleccionamos los vértices del croquis 3D y le damos aceptar.

Figura 14. Muestra el resultado de la implementación del comando Piezas soldadas en SolidWorks.

Estos fueron algunos de los procedimientos de configuración que se hicieron durante al diseño del robot móvil, mediante el software de SolidWorks.

5.2 Diseño sistema de locomoción

En esta sección mostraremos el diseño del sistema de locomoción, mostrando una vista más detallada de los subsistemas que lo componen.

Un robot móvil requiere mecanismos que le permitan desplazarse por todo su entorno y para ello existen una gran variedad de mecanismos llamados de locomoción que le permitirán moverse. El sistema robótico usa ruedas motorizadas que también funcionan como elementos de soporte.

5.2.1 Chasis

El chasis del robot móvil está fabricado de aluminio estructural siendo este el que brinda el sostén o soporte, rigidez y la forma del sistema robótico móvil, mismo que cuenta con 4 ruedas tipo caster para la estabilidad del robot móvil. Ver figura 15.

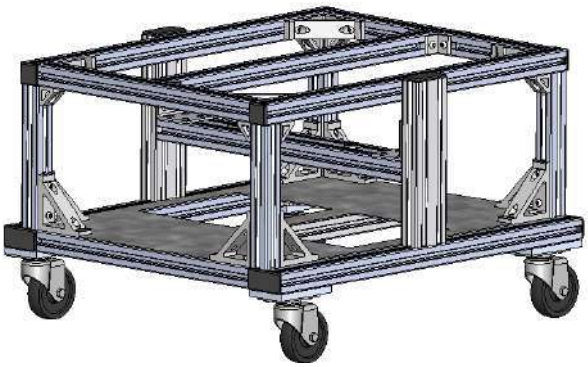


Figura 15. Muestra la vista isométrica del chasis del sistema de locomoción.

5.2.2 Sistema de motriz y dirección

El sistema motriz está compuesto por el motor tipo brushless acoplado a dos soportes paralelos anclados al perfil estructural y al centro cuenta con una flecha guía que está acoplada al sistema de dirección mediante un cople flexible.

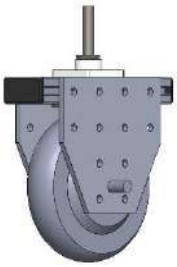


Figura 16. Muestra la vista isométrica del sistema motriz.

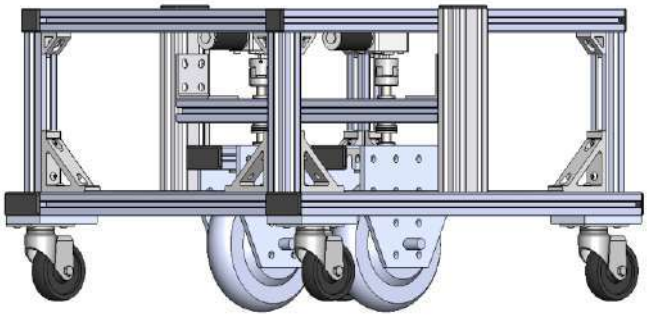


Figura 17. Muestra el ensamble del sistema de locomoción.

5.3 Diseño del sistema de Elevación y posicionamiento

5.3.1 Chasis

Se diseñó la parte superior del robot móvil, cuenta con un rack de recolección de tres niveles el cual servirá para el almacenamiento de material mientras el robot realiza el picking del material en las distintas áreas del almacén. Ver figura 18.

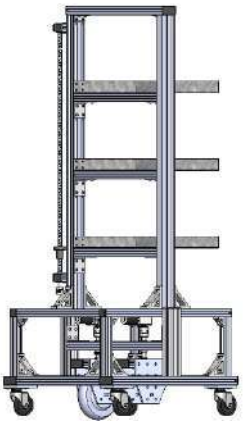


Figura 18. Muestra el rack de recolección implementado al robot móvil.

5.3.2 Sistema de elevación y posicionamiento

La mesa que se desliza a través del rack de recolección cuenta con un sistema de elevación mediante un tornillo sin fin, que le permite posicionarse en los tres niveles del rack. Por medio de guías deslizantes.

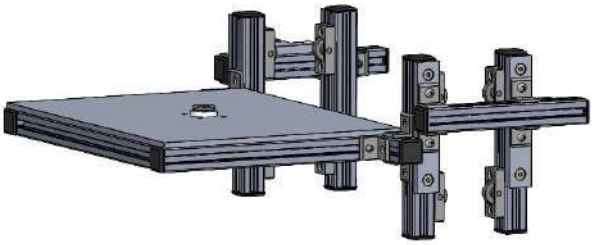


Figura 19. Muestra la Mesa de elevación y posicionamiento de material en el rack.

6. Simulación de movimiento de la mesa de elevación y base

6.1 Proyecciones de posición

El software de diseño implementado para el diseño es SolidWorks, mediante el cual se realizaron cada uno de los diseños del prototipo. Las imágenes siguientes muestran las proyecciones de cada una de las posiciones de recolección del robot móvil. También se muestran proyecciones sobre su desplazamiento en su entorno de trabajo.

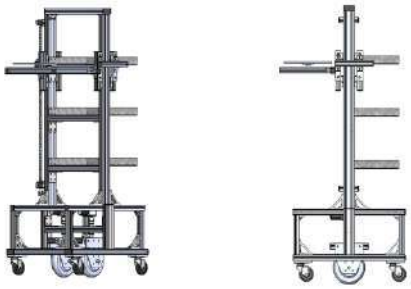


Figura 20. Muestra la primera posición del rack de recolección.

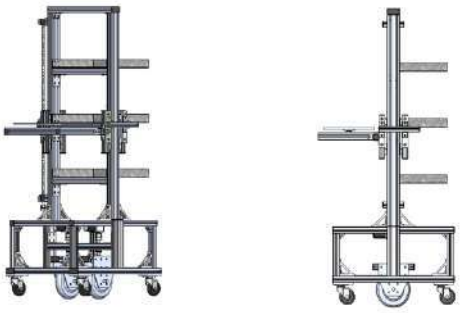


Figura 21. Muestra la segunda posición del rack de recolección.

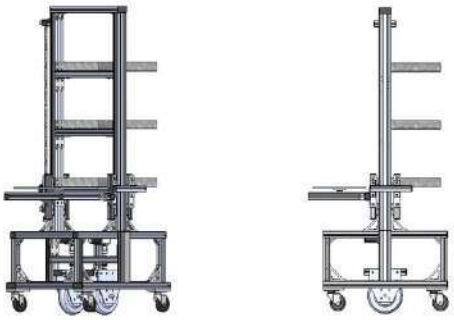


Figura 22. Muestra la tercera posición del rack de recolección.

Figura 23. Muestra la proyección de las trayectorias del robot en movimiento.

Figura 24. Muestra la vista superior de la proyección de trayectorias del motor en movimiento.

Estas son algunas de las proyecciones que se espera realice el robot móvil en su fase ya de fabricación.

7. Dimensiones y peso

7.1 Dimensiones

Para el sistema de prototipo de robot móvil, en la figura 25, se muestran las dimensiones generales del prototipo de robot móvil, para aplicaciones de pick and place. Tiene una altura casi de 1.40 m y 0.68 x 0.58 aproximadamente de base.

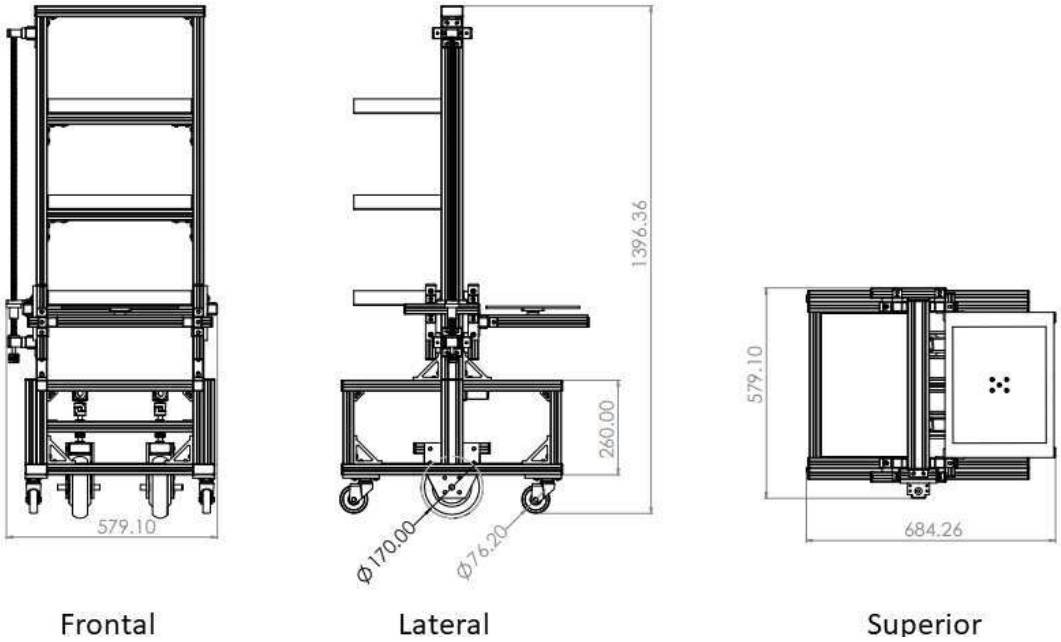


Figura 25. Muestra las Vistas o proyecciones del Chasis

7.2 Peso

El peso del robot móvil se calculó de manera analítica considerando los volúmenes y densidades de los materiales y por medio del software SolidWorks. Observando una variación de 0.05 Kg un error despreciable y normal en el proceso de diseño, por lo tanto, los resultados obtenidos a partir esta medición garantizan el funcionamiento de los equipos seleccionados.

Tabla 4. Muestra el peso calculado analíticamente

Robot móvil	Peso (Kg)
Chasis inferior	18.1946
Chasis superior	8.5908
Sistema motriz	0.7187
Base de ruedas caster	1.4489
Total	28.9530

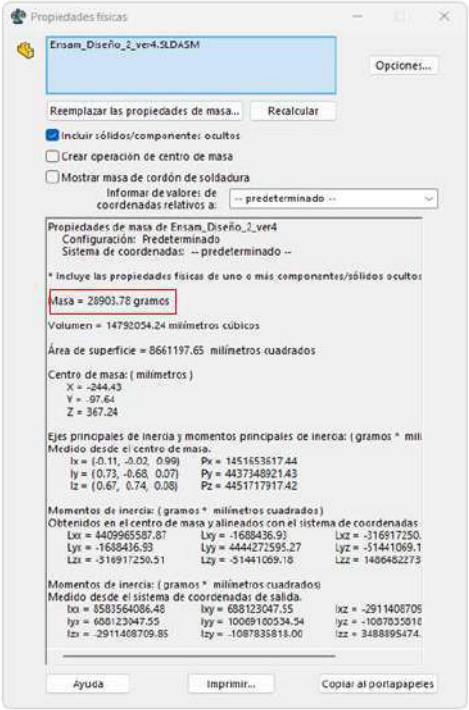


Figura 26. Peso calculado mediante software.

8. Resultados

En esta fase de diseño, como se muestra nos enfocamos en las características mecánicas y morfológicas del robot móvil, de acuerdo al alcance propuesto, y no en la parte sensorial del robot, ni en la etapa de control del mismo. El resultado es un robot móvil el cual cuenta en su parte inferior con una estructura y configuración del tipo diferencial y en la parte superior la configuración de un robot tipo cartesiano de 2 grados de libertad.

El cálculo y corroboración de peso total del sistema robótico permite realizar los cálculos futuros de cada uno de los actuadores a implementar, siendo este uno de los objetivos en la realización del diseño. Por lo tanto, los resultados de los cálculos que resulten a partir de esta medición garantizan el funcionamiento de los equipos seleccionados al ser implementados en sistema real.
La importancia de la implementación y seguimiento en la metodología permitió de manera ordenada ir resolviendo y abordando cada uno de los problemas que puedan surgir en cada una de las etapas de diseño.

9.Conclusiones

En el presente trabajo visualizamos las diferentes etapas para el diseño del prototipo de un robot móvil para aplicaciones de pick and place aplicando de manera adecuada la metodología, esto permitió llevar a cabo un diseño óptimo enfocarnos en cada una de las etapas de diseño hasta obtener un sistema robótico general. El uso y selección adecuado del software de diseño toma un papel muy importante, siendo SolidWorks una herramienta muy poderosa para el prototipado de sistemas robóticos.

Al diseñar este prototipo se demostró su viabilidad para la fabricación del mismo. Aunque durante el diseño nos encontramos con dificultades para la definición o proyección de la morfología del robot

móvil, en el cual yo recomiendo siempre bosquejar el sistema a diseñar, aunque en el transcurso de la etapa de diseño se tengan que rediseñar ciertas partes del robot móvil, ya se tiene un concepto sobre el cual se está desarrollando.

La siguiente etapa que se prevé realizar en corto plazo es el análisis de esfuerzos de cada una de las partes diseñadas para garantizar su óptimo desempeño. Así como los cálculos de todos los actuadores, la implementación del sistema sensorial del robot, su etapa de control y la fabricación física del robot móvil.

Referencias

[1] Kumar S. *"Introducción a la robótica",* McGraw Hill, México, Primera edición en español, 2010.
[2] Reyes F. *"Robótica: control de robots manipuladores",* Alfaomega, México, Primera edición, 2011.
[3] Siegwart R. Nourbakhsh I. Scaramuzza D. *"Introduction to Autonomous Mobile Robots.",* The MIT express, USA, segunda edición, 2011.
[4] Gómez S. *"El gran libro de Solidworks",* Alfaomega, México, segunda edición, 2015.
[5] Hernández J. Escobedo J. *"Desarrollo y Teleoperación de un Robot Móvil para la navegación y asistencia en espacios cerrados."*, *Ingeniantes*, Volumen 1,8 y 2019.
[6] Conti F. *"Motores paso a paso", Alsina*, Argentina, primera edición, 2013.
[7] Takahashi Y. *"Service Robot Applications*", I-Tech, Croacia, Primera edición, 2008.
[8] PARKER HANNIFIN CORP. "*Catalog 1816-3/us*", *Parker Hannifin Corporation*, 256 paginas,2023.
[9] Bunnell B. Najia S. *"Mechanical Engineering for makers",* Community LLC, Canada, Primera edición, 2020.
[10] Sandin P. *"Robot Mechanisms and Mechanical Devices Illustrated",* McGraw Hill, Primera edición, 2003.
[11] Mott R. *"Diseño de elementos de maquinas"*, Pearson Educación, México, Segunda Edición,1995

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 11, pp. 129 – 141
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Control PID en tiempo real aplicado a un sistema de flujo: una experiencia educativa

Farfán Martínez Rosalío, Cambrano Bravata Luz del Alba, Hernández Torres Rogelio y De Aquino May Alonso.

Universidad Tecnológica de Campeche
Carretera Federal 180 s/n, San Antonio Cárdenas, Carmen, Campeche, México, C.P. 24100
farfan678@hotmail.com

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño e implementación en tiempo real de controladores PI y PID analógicos y discretos como parte del curso de control automático a alumnos de nivel ingeniería. Los controladores son aplicados a un equipo didáctico de tanques acoplados multivariable. Los resultados obtenidos muestran un desempeño aceptable de los controladores con señales de control suaves y dentro de los límites de voltaje del actuador. Este tipo de actividades en alumnos universitarios permite generar un aprendizaje significativo en los alumnos, ya que pueden llevar a la práctica los conocimientos adquiridos en el aula, de igual forma les permite apropiarse del conocimiento de manera tal que pueden replicar estas actividades en otros contextos. El problema de control consiste en regular el flujo de agua que ingresa al sistema de tanques acoplados empleando los controladores mencionados.

Palabras clave: Control automático, Tiempo real, Controladores PID, Control de procesos, Sensores.

1. Introducción

El controlador PID (proporcional, integral y derivativo) es un controlador en lazo cerrado que tiene como propósito que el error en estado estacionario entre la señal de referencia y la variable a controlar sea cero de manera asintótica en el tiempo. Los controladores PID son suficientes para resolver el problema de control de diversas aplicaciones y procesos en la industria, particularmente para sistemas de primer y segundo orden [1].

El componente proporcional de un controlador PID mejora el error en estado estable de la respuesta, pero ocasiona cambios bruscos en la respuesta transitoria. La acción integral tiende a reducir o hacer nulo el error en estado estable, ya que agrega un polo en el origen aumentado el tipo del sistema; sin embargo, dicho comportamiento muestra una tendencia del controlador a sobrecorregir el error. La componente derivativa se relaciona con la velocidad de cambio de la variable dependiente, lo que produce una corrección importante antes de que el error sea elevado. La acción derivativa es anticipativa frente a una tendencia elevada del error [2]. Por lo anterior, es necesario una sintonización adecuada de este tipo de controladores.

Dentro del control de procesos, el control del caudal tiene un papel fundamental en la medición de productos en las plantas industriales. El control de caudal se emplea para optimizar rendimientos en las unidades de producción aplicando balances de materia, por lo tanto, es necesario realizar una medición y control adecuados.

El controlador PID es ampliamente conocido y utilizado en distintas aplicaciones en el control de procesos en la industria, control de flujo, nivel, presión y temperatura. En la literatura se han reportado diversos métodos y aplicaciones prácticas que muestran la manera en que la sintonización de los parámetros puede ser implementada. La sintonización de los controladores PID fueron propuestos

desde 1942 en [3], el efecto de las acciones de control que lo integran son analizadas a detalle y se proponen dos métodos experimentales ampliamente conocidos para determinar los parámetros óptimos de este tipo de controladores. La aplicación al control de una válvula se muestra con resultados satisfactorios.

La implementación de diversos esquemas de un controlador PID clásico y su análisis es reportado en [4]. Los esquemas I-PD, PI-D y PID paralelo son aplicados al control angular de un brazo electromecánico accionado por un motor sin escobillas. El controlador PID muestra mejores resultados ya que cumple de manera eficiente los objetivos de control.

El control de nivel de un proceso empleando un controlador lógico programable y el algoritmo PID es analizado en [5]. Los resultados muestran que el diseño de un controlador con un sistema embebido es una buena alternativa de bajo costo para procesos industriales, el dispositivo empleado para esta aplicación es el Siemens Simatic S7-1200.

Controlar un sistema de cracking térmico de aceite de ricino implementando un regulador PID en un dispositivo arduino nano como una experiencia didáctica con alumnos universitarios es analizado en [6]. El tratamiento de los datos, así como la simulación del lazo de control se realiza en el software libre scilab. El control de este proceso presenta buenos resultados en cuanto al seguimiento de la referencia y los voltajes requeridos por los actuadores.

Un estudio comparativo de controladores P, PI y PID aplicados a un robot móvil empleando la plataforma Robotino®View es desarrollado en [7]. Los tres controladores son implementados para controlar el enfoque del objeto en el centro del sensor de visión y la aproximación al objeto por medio de un sensor reflectivo. Los resultados son aceptables, mostrando el PID el mejor desempeño en la ejecución de las tareas del robot.

La aplicación de un controlador PID para sistemas de bombeo directo se analiza en [8]. Se realiza un estudio comparativo de los parámetros hidráulicos y eléctricos de una red de agua experimental automatizada. Los resultaron muestran la eficacia del controlador utilizado para el consumo de agua en diferentes escenarios. Con respecto a la eficiencia energética, se obtiene como resultado adicional un ahorro de energía con el uso del controlador.

El control de un prototipo de fototerapia empleando un controlador PID es diseñado en [9]. El prototipo de cama de fototerapia es construido mediante impresión 3D, tiene integrado un sistema de control para regular la intensidad luminosa de radiación ultravioleta ante perturbaciones externas. El algoritmo PID es implementado en un microcontrolador ATmega328P132 que otorga la respuesta a una lámpara LED la cual varía la intensidad. Los resultados obtenidos muestran un desempeño aceptable con la metodología propuesta.

Este trabajo muestra el diseño de controladores PID y PI analógicos y discretos para el control de flujo en tiempo real en un equipo didáctico, como parte de una actividad práctica con alumnos de nivel universitario. Este tipo de actividades son de vital importancia en la formación de profesionistas ya que permiten relacionar la teoría y la práctica. El flujo de agua que ingresa al equipo didáctico es regulado de manera eficaz en los diversos esquemas implementados.

2. Descripción del equipo didáctico

El equipo didáctico CE105MV de la marca Tecquipment® se emplea en el estudio del transporte de fluidos y en los problemas de control del nivel de líquidos tal como ocurre en los procesos de control de la industria. Específicamente, el sistema de tanques acoplados está constituido por 2 tanques verticales separados los cuales son conectados por un canal de flujo; una válvula manual es usada para variar el área de sección transversal del canal, por lo tanto, cambia las características del flujo entre los tanques [10].

Contiene una bomba impulsada por un motor eléctrico en cada tanque, la velocidad puede ser ajustada de manera manual si es necesario. El circuito puede ser calibrado entre cero y flujo máximo cuando la señal de control en el panel frontal es variada de 0 a 10 volts. Un tanque separado en la base del equipo se utiliza para almacenar agua y que pueda ser utilizada en el proceso.

En el panel frontal existen tres válvulas manuales, la válvula A conecta los dos tanques, las válvulas B y C se emplean para drenar el agua de cada tanque hacia el tanque almacenador. La escala de cada válvula varía entre cero y cinco, que equivalen de 0 a 100% de apertura. En la figura 1 se puede apreciar el equipo didáctico.

Figura 1. Equipo didáctico CE105MV. Reimpreso de "*CE105MV Coupled Tanks*", Tecquipment Ltd, 2009.

Las características más importantes del equipo y los rangos de voltaje empleados se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Características del equipo.

Componente	Descripción
Tanque A	Área de sección transversal de 9350mm^2
Tanque B	Área de sección transversal de 9350mm^2
Válvulas A,B,C	Válvula de 10mm de orificio; Área de sección transversal 78.5mm^2
Sensor de nivel	0 a 10 volts de C.D. equivalentes de 0 a 250 mm como se indica en cada tanque
Sensor de flujo	0 a 10 volts de C.D. equivalentes de 0 a 4 L/min.
Bomba de agua	0 a 10 volts de C.D. voltaje de entrada
Rotámetro	0 a 4 L/min

3. Metodología

3.1 PID analógico

Un controlador de tipo PID se desarrolla cuando la salida del controlador *v(t)* es proporcional al error *e(t)*, sumado a una cantidad proporcional a la integral del error más una cantidad proporcional a la derivada del error [2], como se aprecia en la ecuación 1.

$$v(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i}\int e(t)dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \tag{1}$$

En términos de la transformada de Laplace, se obtiene:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{2}$$

Ziegler y Nichols proponen reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p, del tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d en [3], analizando las características de la respuesta transitoria del sistema. Esta determinación de parámetros se realiza mediante experimentos sobre la planta. Existen dos métodos de sintonía denominados reglas de Ziegler-Nichols, en este trabajo se aborda el primer método debido a las características del sistema y su respuesta transitoria.

En el primer método, la respuesta de la planta ante una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental y es analizada. Si el sistema no tiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta tendrá la forma mostrada en la figura 2 [11].

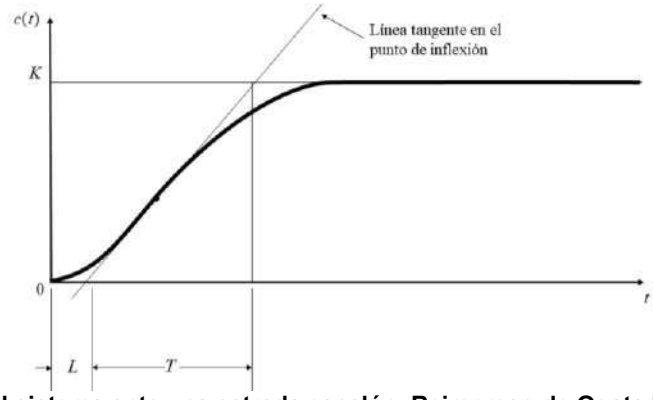


Figura 2. Respuesta del sistema ante una estrada escalón. Reimpreso de Ogata K. "*Ingeniería de Control Moderna*", Pearson, Madrid, 5ta, edición, 2010.

La curva de respuesta de la figura 2 se caracteriza por dos parámetros importantes, el tiempo de retardo *L* y la constante de tiempo *T*. Estos parámetros se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y con la línea de la ganancia estática *K*. Con estos valores es posible sintonizar el controlador PID en la tabla 2.

Tabla 2. Reglas de sintonización del controlador PID. Reimpreso de Ogata K. "*Ingeniería de Control Moderna*", Pearson, Madrid, 5ta, edición, 2010.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	*T/L*	∞	*0*
PI	*0.9(T/L)*	*L/0.3*	*0*
PID	*0.12(T/L)*	*2L*	*0.5L*

Se determina la función de transferencia de la planta realizando una aproximación de un sistema de primer orden con retardo como se muestra en la ecuación 3.

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1} \tag{3}$$

El esquema de control para el PID analógico se puede apreciar en la figura 3, es importante notar que los controladores PID utilizan el error generado entre la señal de referencia y la salida de la planta para actuar sobre él y minimizarlo. Para minimizar el error emplea los tres componentes, ganancia proporcional, el tiempo integral y el tiempo derivativo.

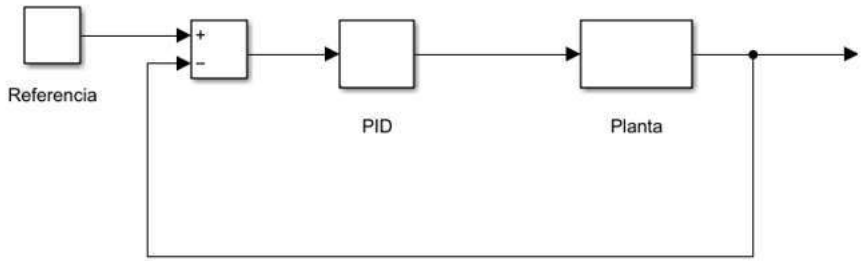


Figura 3. Esquema de control PID analógico.

3.2 PID discreto

A partir del diseño del controlador PID analógico, es posible diseñar un controlador PID discreto por diferentes aproximaciones, de diferencias hacia adelante o método de Euler, de diferencias hacia atrás o backward y método bilineal o de Tustin [12]. Estas aproximaciones se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Aproximaciones PID discreto.

Aproximación	Sustitución	Proporcional	Integral	Derivativo
Hacia adelante	$s=\frac{z-1}{T}$	K_p	$K_i\left(\frac{T}{z-1}\right)$	$K_d\left(\frac{z-1}{T}\right)$
Hacia atrás	$s=\frac{z-1}{Tz}$		$K_i\left(\frac{Tz}{z-1}\right)$	$K_d\left(\frac{z-1}{Tz}\right)$
Bilineal	$s=\frac{2}{T}\left(\frac{z-1}{z+1}\right)$		$K_i\frac{T}{2}\left(\frac{z+1}{z-1}\right)$	$K_d\frac{2}{T}\left(\frac{z-1}{z+1}\right)$

Las aproximaciones se determinan realizando la sustitución correspondiente en la función de transferencia del controlador PID en el dominio de Laplace. Para el caso discreto, *T* representa el tiempo de muestreo del sistema. Es importante hacer notar algunas consideraciones; en la aproximación hacia adelante, se tiene un sistema no causal, lo cual no es del todo factible implementar físicamente; la aproximación bilineal, ubica un polo en -1, lo cual puede provocar cambios bruscos en la salida del PID. El esquema ha implementar en el caso del PID discreto es el que se muestra en la figura 4.

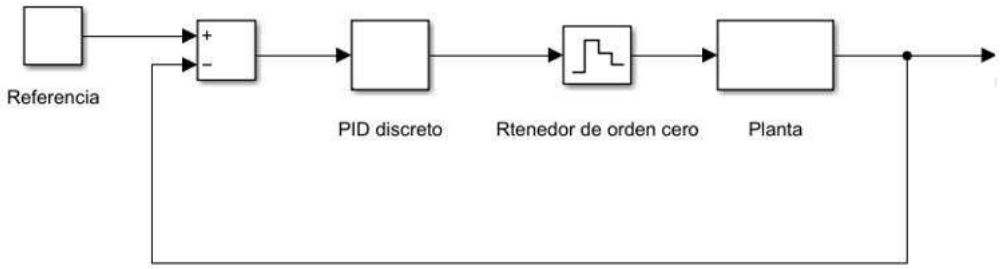


Figura 4. Esquema de control PID discreto.

El retenedor de orden cero es empleado para muestrear la señal proveniente del PID discreto y enviarla a la planta cada tiempo de muestreo asignado. Los procesos industriales tienen dinámicas un poco más lentas que otro tipo de sistemas de control, sin embargo, la determinación del tiempo de muestreo adecuado para realizar el control de las variables involucradas es importante en la obtención de bueno resultados.

4. Resultados

4.1 Hardware y software.

Para realizar la implementación de los esquemas de control se utiliza la herramienta Simulink® de Matlab®. Es una herramienta que sirve para simular el comportamiento de los sistemas dinámicos, los cuales pueden ser sistemas lineales o no lineales, modelos en tiempo continuo o en tiempo discreto y sistemas híbridos de todos los anteriores. Contiene un entorno de diagramas de bloques que se emplean para diseñar sistemas con modelos multidominio, simular antes de implementar en hardware y desplegar sin necesidad de escribir código.

Dentro de las herramientas de Simulink® se encuentra una muy importante para la adquisición de datos (Data Adquisition Toolbox). Proporciona una serie de aplicaciones y funciones para configurar hardware de adquisición de datos, escribir datos en canales de dispositivos analógicos y digitales. Los datos se pueden analizar a medida que se adquieren o se pueden guardar para su procesamiento posterior. También permite automatizar las pruebas y realizar actualizaciones iterativas en la configuración de prueba en función de los resultados de los análisis. Una de sus principales características es que soporta una gran cantidad de dispositivos de adquisición de datos, incluso dispositivos USB.

Con respecto al hardware, en este trabajo se utiliza la tarjeta de adquisición de datos USB-6008 de National Instruments®. Es un dispositivo multifunción que contiene entradas y salidas analógicas y digitales, brinda funcionalidad básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos de laboratorio. La conexión se realiza vía USB y puede conectarse fácilmente a sensores y señales. Entre sus características técnicas más importantes se puede mencionar que puede muestrear 10000 muestras por segundo, dos salidas analógicas de 0 a 5 volts, ocho entradas analógicas de -10 a 10 volts.

El esquema de implementación entre el hardware y el software se puede apreciar en la figura 5.

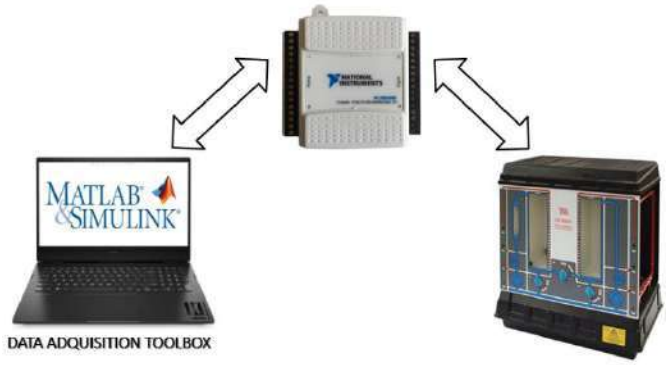


Figura 5. Esquema de comunicación de señales.

4.2 PID y PI analógicos.

Como primer paso para realizar este trabajo, se procede a determinar la ganancia del sensor de flujo, ya que sólo se puede recibir el voltaje generado por este, pero no se conoce el flujo en términos de litros por minuto (L/min). Para realizar esta actividad, se incrementa el voltaje en la bomba hasta alcanzar el flujo deseado en la escala del rotámetro y se registra el voltaje del sensor de flujo; de esta manera se muestrea toda la escala del rotámetro y se obtiene una tabla de valores que relaciona el flujo de agua con el voltaje del sensor. Posteriormente se grafican los datos obtenidos y se obtiene la figura 6.

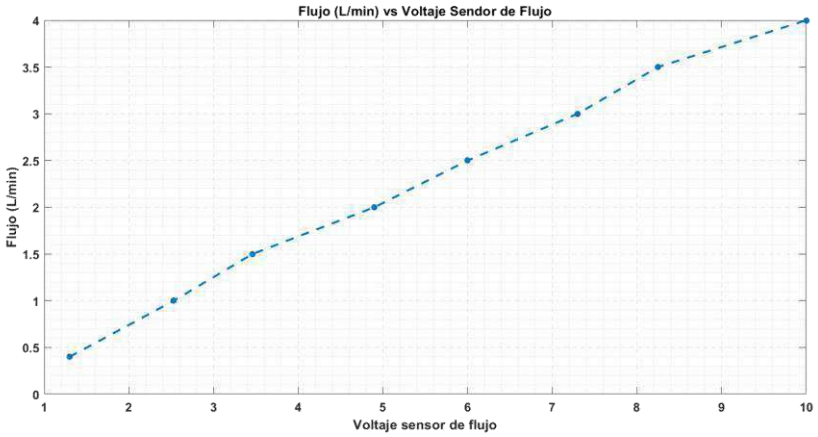


Figura 6. Flujo de agua vs voltaje del sensor.

Los datos graficados se aproximan a una línea recta, en este caso, la ganancia del sensor de flujo será la pendiente de dicha recta, de esta manera se obtiene la ganancia del sensor como 0.4370 L/min/V (litros por minuto por volt). Otro dato importante obtenido en este proceso, es que el motor eléctrico de la bomba tiene una zona muerta de alrededor de 2 volts, lo cual resulta importante para determinar la manera en que se obtendrá la respuesta al escalón.

El siguiente paso en el proceso es realizar la prueba al escalón para determinar las características de la planta y diseñar el controlador PID. Teniendo en cuenta la zona muerta ya mencionada, se determina realizar la prueba con un escalón de 5 volts, tal como se aprecia en la figura 7.

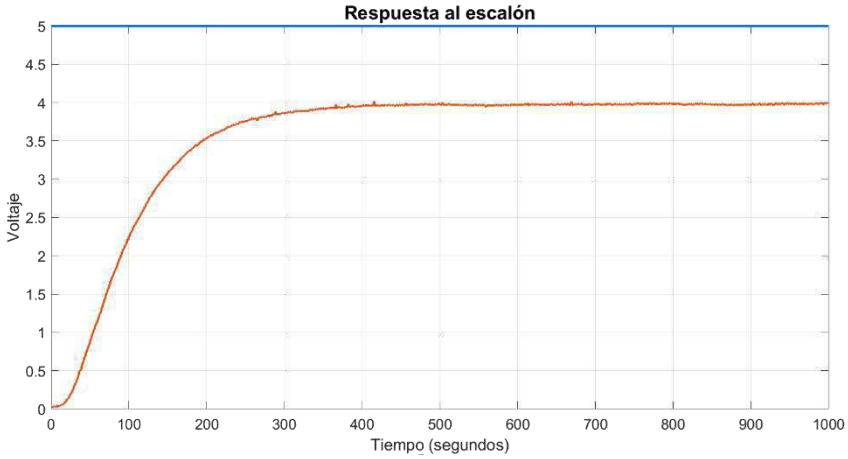


Figura 7. Respuesta al escalón.

La respuesta del sistema es parecida a un sistema de primer orden tal y como se menciona en el primer método ya analizado. Se determinan el retardo y la constante de tiempo y de la tabla 2 se determinan los tres parámetros del controlar PID, los cuales, después de una sintonización fina, son los siguientes: $K_p=1;\ T_i=0.01;\ T_d=0.001$

Con estos parámetros se construye el esquema de control en Simulink® utilizando todos los elementos comentados en la sección 4.1, quedando dicho esquema como se muestra en la figura 8.

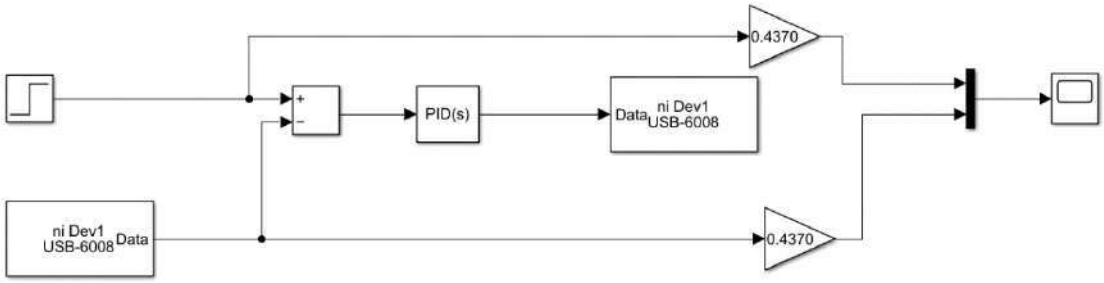


Figura 8. Esquema de control en Simulink®.

En la figura 9 se muestra la salida de la planta y la señal de referencia; alrededor de 700 segundos se realiza el control del flujo en el equipo. La respuesta es suave y sin sobre impulsos.

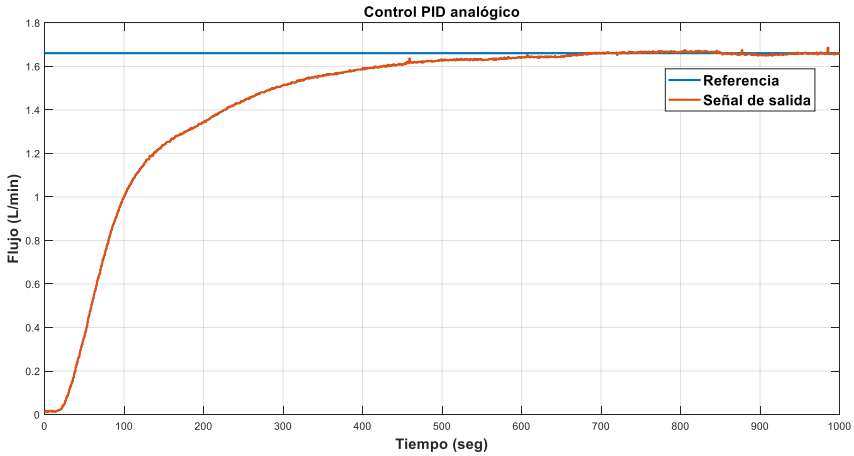


Figura 9. Control de flujo.

En la figura 10 la señal de control es mostrada, la cual se presenta suave y dentro de los límites del actuador. Esta señal es la que ingresa directamente a la bomba del equipo e impulsa el agua dentro del sistema de tanques.

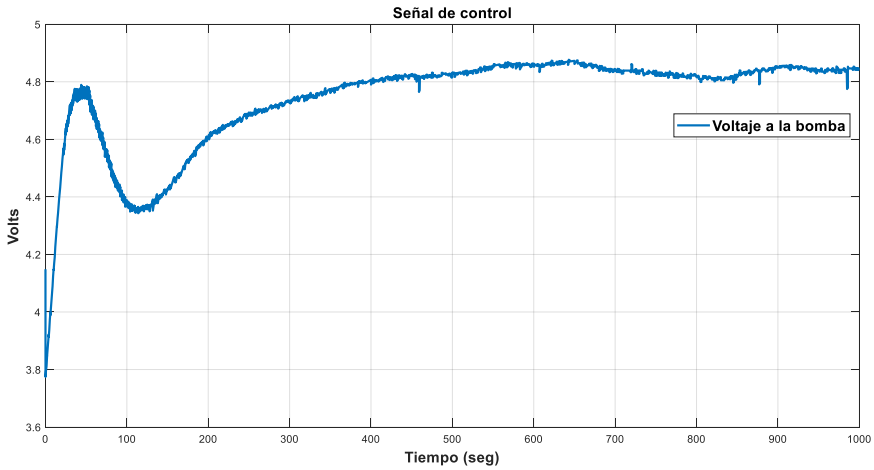


Figura 10. Señal de control.

El error de control se aprecia en la figura 11, el cual tiene relación con el control de flujo presentado en la figura 9. Conforme el flujo alcanza la referencia deseada el error tiende a cero y se estabiliza.

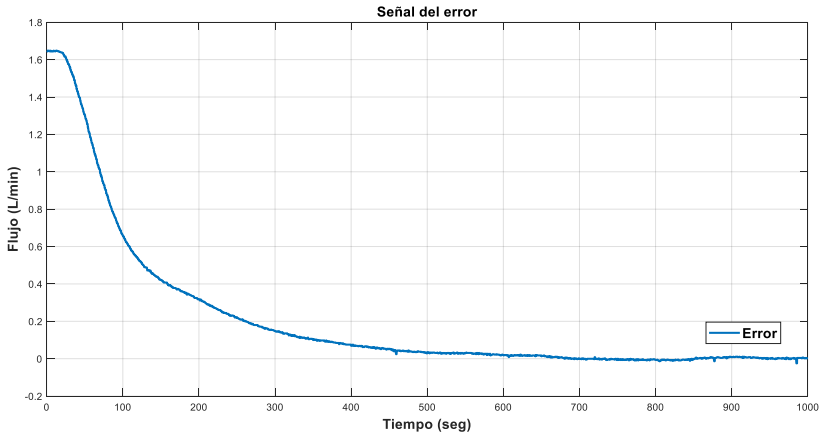


Figura 11. Error de control.

Un controlador PI es diseñado tomando en cuenta las características del sistema, en las figuras 12, 13 y 14 se puede apreciar su desempeño. En este caso, se puede apreciar un mejor desempeño del controlador en la figura 12, ya que, la respuesta del sistema se estabiliza alrededor de 500 segundos de la implementación. La señal de control que representa el voltaje aplicado a la bomba se encuentra entre 3 y 4.4 volts sin oscilaciones ni cambios bruscos; el error tiende a cero a medida que se logra el control del flujo.

Es importante mencionar que el motor eléctrico de la bomba tiene una zona muerta de aproximadamente 2 volts, en este sentido, la señal de control debe ser mayor de este voltaje para que tenga efecto en el funcionamiento del equipo, ya que, de lo contrario, la bomba no accionará. En ambos esquemas analógicos la ley de control supera este umbral.

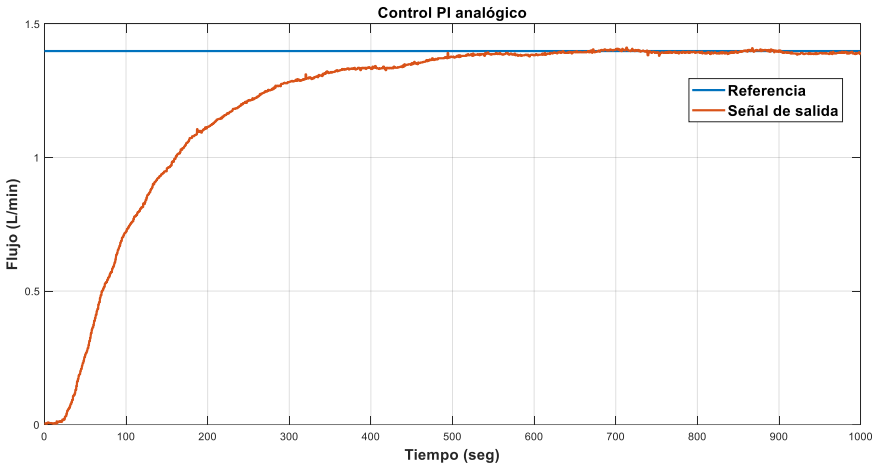


Figura 12. Control PI analógico.

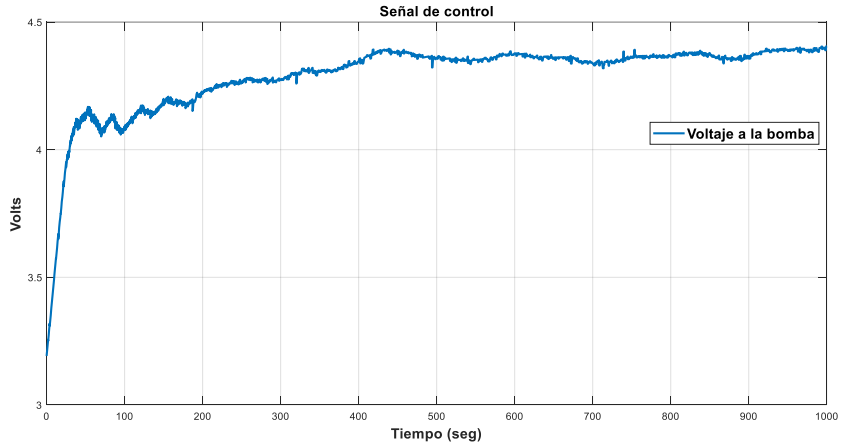


Figura 13. Señal de control PI analógico.

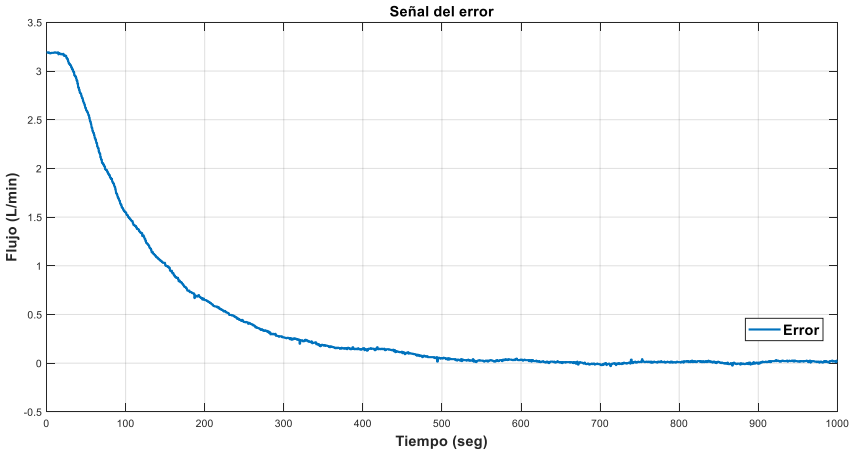


Figura 14. Error de control PI analógico.

4.3 PID y PI discretos (aproximación hacia atrás)

A partir del diseño de los controladores analógicos y con la información presentada en la tabla 3, se diseña en primera instancia un controlador PID discreto con tiempo de muestreo de 0.01 seg, este tiempo de muestreo es el sugerido por el fabricante en [10]. En las figuras 15 y 16 se muestra el esquema de control en Simulink® y la variable controlada respectivamente. En este caso, la estabilización de la salida se logra alrededor de 600 segundos.

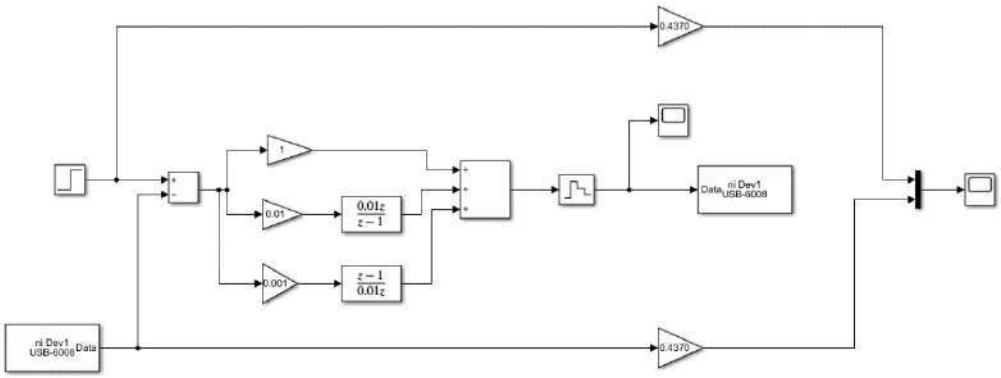


Figura 15. Esquema de control de control PI discreto.

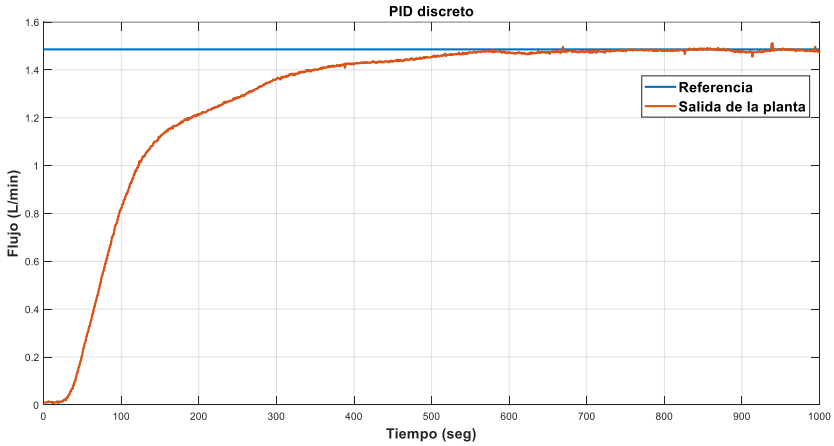


Figura 16. Control PID discreto.

La señal de control con el voltaje aplicado a la bomba de agua y el error de control se aprecian en las figuras 17 y 18 respectivamente. La ley de control se encuentra por encima del voltaje de zona muerta y no supera los 4.6 volts como valor máximo. El error tiende acero a medida que se alcanza la referencia deseada.

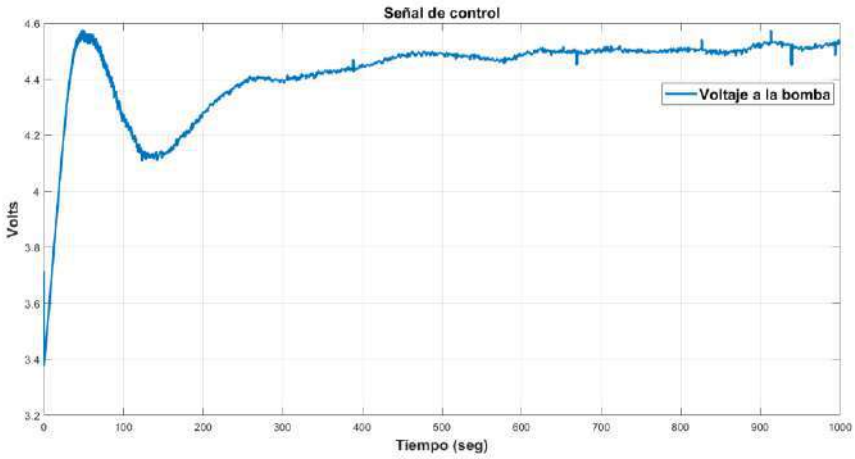


Figura 17. Señal de control PID discreto.

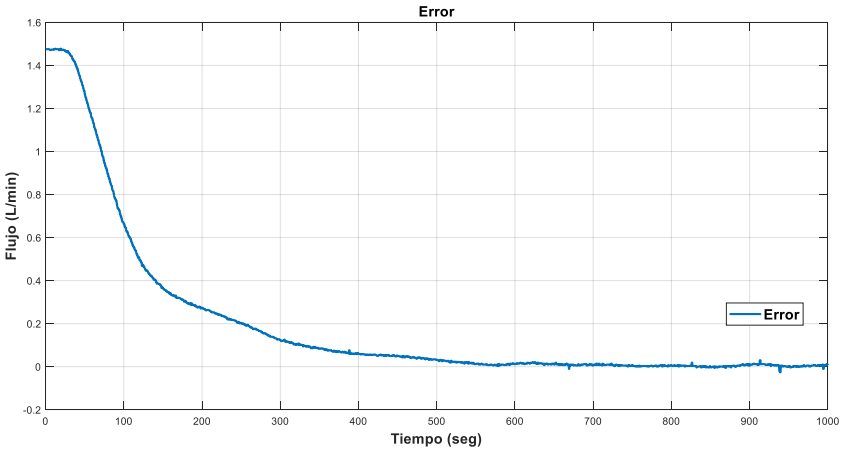


Figura 17. Error de control PID discreto.

El desempeño del controlador PI discreto en tiempo real se aprecia en las figuras 18, 19 y 20. La referencia es alcanzada alrededor de 600 segundos y se mantiene estable. La ley de control se presenta dentro de los límites del actuador y el error tiende a cero a medida que el flujo es controlado en el valor deseado.

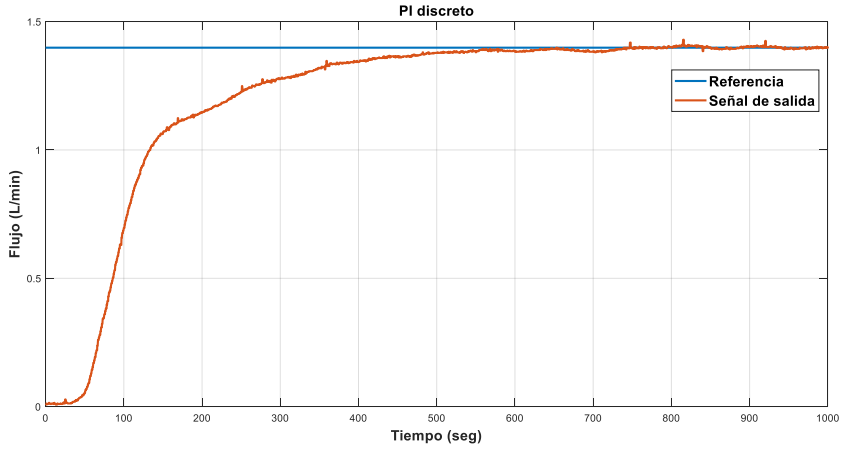


Figura 18. Control PI discreto.

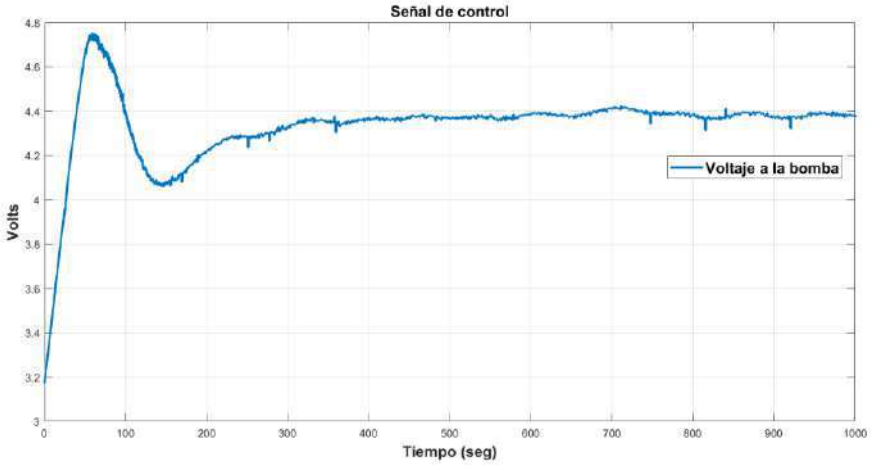


Figura 19. Señal de control PI discreto.

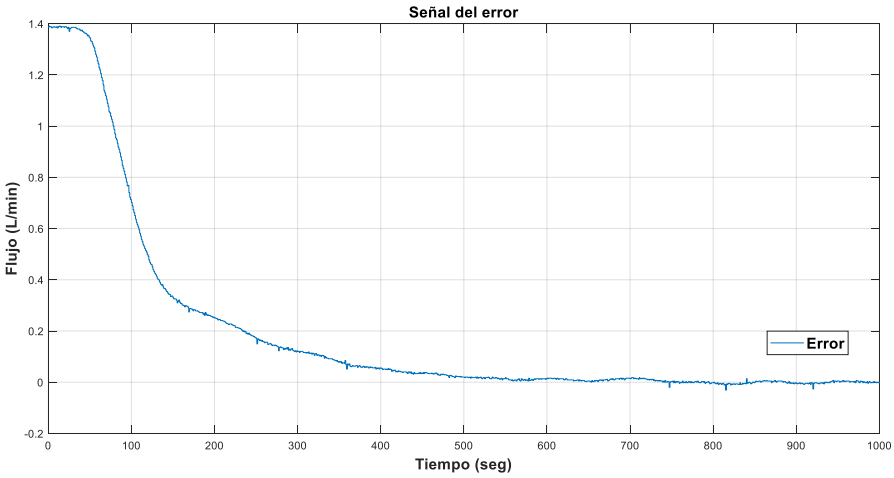


Figura 20. Error de control PI discreto.

5. Conclusiones

El diseño de controladores PI y PID y su implementación en tiempo real representan una buena alternativa para que alumnos de nivel ingeniería puedan relacionar los conocimientos teóricos con la práctica. En este trabajo se diseñaron controladores PI y PID analógicos y discretos y se aplicaron en tiempo real a un sistema de tanques acoplados; en todos los casos con resultados satisfactorios en cuanto al control de la variable de flujo. Las leyes de control, que representan el voltaje aplicado a la bomba de agua del equipo, se presentan suaves sin cambios bruscos en su dinámica y dentro de los límites permitidos por el actuador. Se puede apreciar también que el error tiende a cero a medida que la variable a controlar alcanza la referencia asignada. Aplicar los conocimientos teóricos juega un papel fundamental en el aprendizaje significativo de los alumnos, ya que implica desarrollar una serie de habilidades, en este caso, el manejo del software requerido, la conexión y comunicación de la tarjeta de adquisición de datos y el manejo de señales de los sensores del equipo. El problema de control se resuelve con todos los esquemas implementados, ya que se logra controlar el flujo y el voltaje aplicado al actuador se encuentra dentro de los límites permitidos, pero el controlador PI analógico es el que presenta mejores resultados, ya que estabiliza la salida en menos tiempo, 500 segundos, en comparación con los otros esquemas desarrollados.

Como trabajos futuros en cursos de control a alumnos de ingeniería se pretende realizar las siguientes actividades:

1.- Diseñar e implementar controladores PI y PID en tiempo real para el control de nivel en uno de los tanques del sistema.
2.- Analizar el desempeño de los controladores empleando diferentes índices de minimización del error.
3.- Controlar el nivel de agua en los dos tanques del equipo, utilizando ambas bombas de agua.

Referencias

[1] Torres W, Farfán R, Cambrano L, López J, Tejero J, Mejía G. “Control PID Aplicado a un Equipo de Regulación de Caudal”, Memorias CONIEEM 2015. Instituto Tecnológico de Mérida, 272-279, 2015.
[2] Hernández R. “*Introducción a los Sistemas de Control*”, Pearson, México, Primera edición, 2010.
[3] Ziegler J, Nichols N. “*Optimum Settings for Automatic Controllers*”, Transactions of de A.S.M.E. American Society of Mechanical Engineers, 64, 759-768, 1942.
[4] Astudillo H, Gallardo J, Ayala C. “*Estudio comparativo de algoritmos de control PID clásico para el control angular de un brazo electromecánico*”, Ingeniare, 28, 4 612-628, 2020.
[5] Bermeo L, Álvarez J, Mantilla W. “*Comparación del desempeño de un controlador PID sobre el proceso de nivel usando un controlador lógico programable y un sistema embebido*”, Ingeniare,29,4, 622-632, 2021.
[6] Guillén C, Ramos A, Santana J. “Diseño experimental de un regulador PID de bajo costo para complementar el aprendizaje en control de procesos”, III Jornadas Iberoamericanas de Innovación Educativa en el Ámbito de las TIC”, 161-168, Las palmas de Gran Canaria, 2016.
[7] Méndez H, Jalomo J, Ordoñez F, García J. “*Comparativa de controladores P, PI, PID para la ubicación y seguimiento de objetose la plataforma Robotino®View*”, Congreso Nacional de Control Automático, Asociación Mexicana de Control Automático, 49-52, Cd. Del Carmen, Campeche, México, 2012.
[8] Salvino L. Mendonca K, Linhares A, Pimentel H, Marques S. “Aplicación del Controlador PID en Sistemas de Bombeo Directo”, Acta Universitaria, 26, 3, 91-97, 2016.
[9] Peñaloza G, Adame D, García J. “*Control PID Aplicado a un Prototipo de Fototerapia*”, PÄDI, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 10, 5, 53-58, 2022.
[10] “*CE105MV Coupled Tanks*”, Tecquipment Ltd, 2009.
[11] Ogata K. “*Ingeniería de Control Moderna*”, Pearson, Madrid, 5ta, edición, 2010.
[12] Ogata K. “*Sistemas de Control en Tiempo Discreto*”, Prentice Hall, México, 2da. edición, 1996.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 12, pp. 142 – 149
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Modulación PWM para el control de velocidad del motor brushless implementado en un spin coater

✉ Alejandre Flores Marisol, Hernández Oliva Noemi y Frausto Orozco Leonardo Eldriel

Instituto Politécnico Nacional CECyT Miguel Bernard
✉ malejandref@ipn.mx

Resumen

En el presente trabajo se implementa el control de velocidad de un motor de corriente directa de tipo Brushless mediante la técnica de modulación por ancho de pulso (Pulse Width Modulation, por sus siglas en inglés), este método consiste en la variación del ciclo de trabajo (DC, duty cycle) y manteniendo la frecuencia en un valor constante, el cual forma parte de un prototipo con el que se cuenta. Para la implementación del control de velocidad se utilizó una placa de desarrollo Arduino MEGA el cual contiene el programa para generar la señal requerida para enviar al motor y así poder variar el número de revoluciones por minuto, al ser parte de un prototipo es necesario que esta técnica se ajuste a los parámetros obtenidos del funcionamiento del prototipo. Para ello se realizaron mediciones de la señal generada y su variación durante el funcionamiento del motor con lo cual fue posible verificar que la implementación de la técnica mantuvo de igual forma valores cercanos a los obtenidos en la IDE de Arduino en pruebas previas realizadas, con lo que quedo demostrado que es una opción viable para realizar el control de la velocidad de un motor.

Palabras clave: Motor Brushless, Arduino MEGA, modulación PWM, control de velocidad,

1. Introducción

En el desarrollo actual de la electrónica, se puede ver como cada vez más procesos se han automatizado y se reducen los tiempos de producción respecto a las épocas pasadas, la mayoría de estos procesos requieren de motores controlados bajo la electrónica digital o analógica, lo que permite controlar la posición y la velocidad de dichos motores.

En [1] se menciona que existen diferentes técnicas de control que se han convertido en una herramienta fundamental para abordar problemas complejos, por lo que la información disponible acerca del tema de estudio de este artículo es la implementación del control de velocidad de un motor de tipo Brushless por medio de la técnica de modulación por ancho de pulso (PWM) que permita aplicar esta técnica a un prototipo con el que se cuenta dentro del laboratorio y que requiere del control de velocidad para su mejor funcionamiento, y se puedan controlar las revoluciones por minuto por lo que para esta investigación y en el mismo sentido se revisaron diferentes trabajos donde se aplicaban los diferentes métodos para la regulación de la velocidad en motores de tipo Brushless.

Por lo que resulta relevante el controlar la velocidad de giro del motor de tipo Brushless mediante la modificación del ciclo útil de la señal proveniente del PWM. Por lo que se refiere en [2], la señal proveniente del PWM se realimenta en el sistema y se implementa un control de tipo PID que mantenga la equivalencia entre el valor promedio de la señal y la velocidad angular deseada. Cabe añadir, que al mismo tiempo se debe de modificar el voltaje promedio entregado del motor, también se modifican los tiempos de conmutación y esto permite el aumento y la disminución del rotor del motor.

Como mencionan en [3] es importante también el control de la frecuencia con la que se alimenta las terminales del motor, es decir solo deberá estar alimentado por lapsos de tiempo los cuales controlaran su velocidad, es decir se está controlando la velocidad por PWM controlando los tiempos de operación, por lo que a más tiempo menos velocidad, y a menor tiempo mayor velocidad.

Por otro lado, se menciona que la modulación de ancho de pulso (PWM) es la base de control en la electrónica de potencia, y el principio básico de los métodos PWM, que logra un rendimiento optimo en términos de control y calidad de energía [4].

En relación con la velocidad angular está relacionada de forma directa con la frecuencia de conmutación de las fases del motor y también del número de polos de este, como lo mencionan en [5] lo que ha permitido establecer diferentes velocidades en el prototipo, modificando la velocidad y los tiempos de operación. En [6] hacen referencia a este tipo de motores sin escobillas es decir de tipo brushless, que trabajan por medio de variadores, también llamados controladores de velocidad (electronic speed controller o ESC), que transforman la corriente continua de las baterías en una tensión que alimenta a las bobinas del motor en cierta secuencia y dependiendo de la posición del rotor.

Los trabajos anteriores han dado la pauta para poder determinar el uso de los controladores de velocidad (ESC) para el control de velocidad por medio de la variación de ciclo de trabajo manteniendo el valor de la frecuencia constante, lo que permitiría que el motor incremente gradualmente la velocidad hasta alcanzar el valor máximo de rpm. La señal PWM será generada por medio de un controlador Arduino MEGA, después entrará a la etapa de modulación de la PWM por medio del ESC para poder controlar la velocidad del motor Brushless.

El presente articulo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se realiza un análisis del sistema propuesto para la aplicación de la técnica de control de las PWM, así como las conexiones eléctricas electrónicas, donde se incluye el controlador de sistema. En la sección 3 se implementa la regulación por PWM de la velocidad del motor y el análisis de los resultados. Finalmente, en 4 se presentan las conclusiones de la técnica de modulación y de las pruebas que se realizaron físicamente.

2. Análisis del sistema propuesto

El sistema completo está integrado por un prototipo de Spin Coater, el cual es un instrumento utilizado para la fabricación de películas delgadas (capas de material que tienen un grosor nanométrico o micrométrico) que son ampliamente utilizadas en la industria a química, eléctrica, nanotecnológica, farmacéutica, alimenticia, entre otras, para aplicar capas finas y uniformes de materiales sobre sustratos (es la superficie sobre la cual se deposita el fluido), en la Figura 1 se muestra un esquema de las partes que componen el prototipo con el que se cuenta.

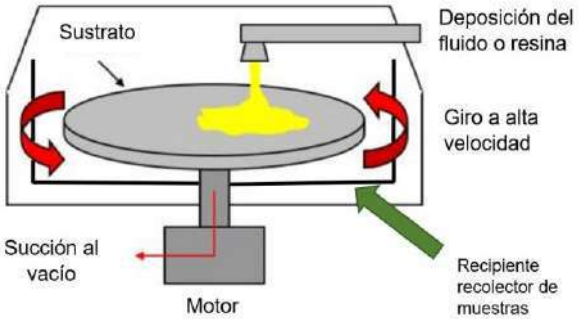


Figura 1. Partes principales del sistema Spin Coater. Fuente: Modificada de Ansforce marzo, 2018.

En la Figura 2, se presenta el diagrama de flujo del funcionamiento de todo el prototipo. Sin embargo, este trabajo se enfoca en el análisis y control del motor que es parte del sistema completo del

prototipo y que se encarga de la aplicación del método de rotación para la deposición del material por lo que fue necesario enfocarse en considerar los siguientes puntos:

a) Velocidad de rotación: la cual está determina el grosor y la uniformidad de la capa depositada.
b) Tiempo de giro: es necesario para asegurar que la capa depositada sea uniforme y tenga el grosor deseado.
c) Limpieza: para evitar la contaminación de la capa depositada.

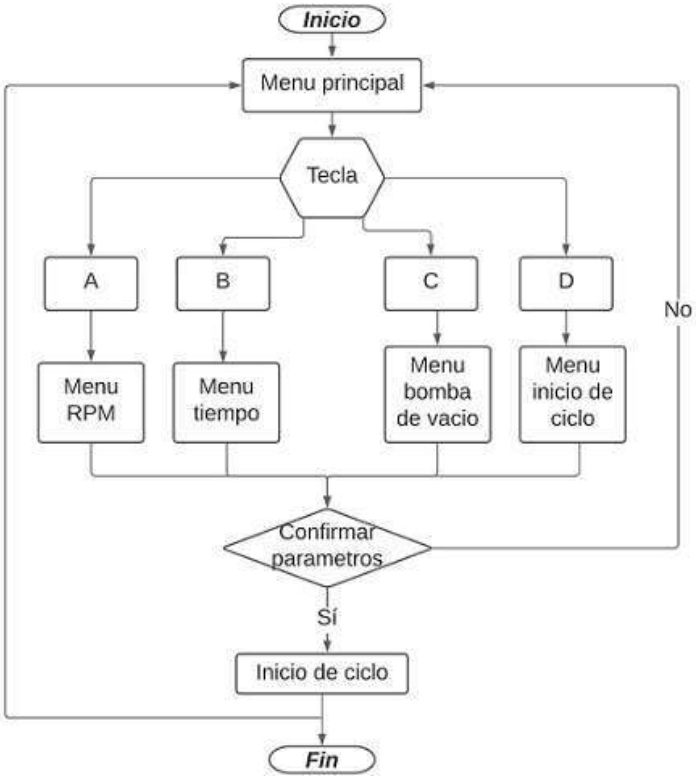


Figura 2. Diagrama de flujo de la interfaz de usuario del prototipo. Fuente: Autoría propia.

El prototipo está integrado por las conexiones eléctricas electrónicas mostradas en la Figura 3, los cuales a su vez están colocados en un gabinete impreso en 3D, sin embargo, como ya se mencionó el interés de este trabajo se centra en la etapa del control de la velocidad del motor tipo Brusshless. En las siguientes subsecciones se detallan los parámetros del microcontrolador Arduino MEGA y del motor junto con su etapa de potencia.

2.1 Controlador del sistema

El controlador requerido para cumplir con el objetivo de mantener la velocidad de rotación del motor de forma constante, se utilizó una placa de desarrollo Arduino MEGA, el cual contiene la programación requerida para cumplir con esta condición. De forma general en la Tabla 1 se presentan las principales características de este.

2.2 Motor Brushless

Por otro lado, el motor utilizado es un motor de CD de tipo Brushless y como etapa de potencia un controlador de velocidad electrónico. Es importante recalcar, que se eligió este tipo de motor debido a las ventajas que tiene como son un mayor rendimiento energético, precisión y potencia a comparación de otros motores, además ofrece una reducción de ruido, poco mantenimiento y no presenta fricción ni

caída de tensión lo que aumenta la vida útil del motor. Los principales parámetros con los cuales cuenta el motor se presentan en la Tabla 2.

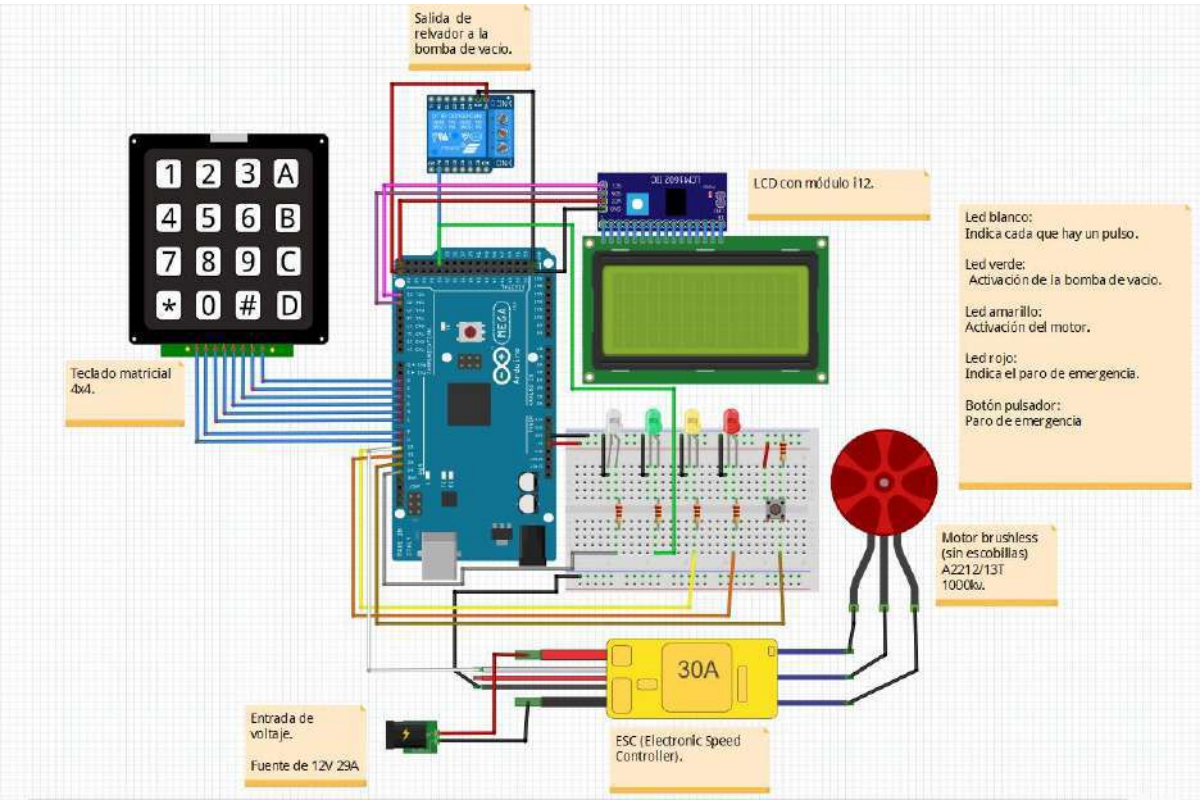


Figura 3. Diagrama de conexiones eléctricas/electrónicas del prototipo de spin coater. Fuente: Autoría propia.

Tabla 1. Características Técnicas de Arduino Mega.

Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada	7-12 V (recomendado)
Pines de E/S digitales	54 (14 salida PWM)
Pines de entrada analógica	16
Corriente DC por pin de E/S	40 mA
Corriente por pin de 3.3 V	50 mA

Tabla 2. Características Técnicas del motor Brushless.

Corriente nominal	1.3 A
Fuerza electromotriz	1000 RPM/V
Intensidad de corriente eléctrica	4-10 A
Resistencia	0.090 Ω
Potencia	150 W

2.3 ESC (Electronic Speed Controller)

En la interfaz de potencia se consideró un circuito electrónico que permitiera variar la velocidad del motor brushless, así como la dirección llamada ESC (Electronic Speed Controller) o Control electrónico de velocidad. El uso de este componente es necesario ya que los motores brushless no se pueden conectar de manera directa, ya que cuentan con varias bobinas, por lo que se requiere de un ESC, que permita que se alternen los voltajes del motor. Además, de que se puede controlar la polaridad de los bobinados junto con el giro del motor. Las principales características de este controlador modelo ESC 30A se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Características Técnicas del ESC 30A (Electronic Speed Controller).

Voltaje de entrada	2-4 VCD
Corriente continua	30A
Corriente máxima	40A

3. Implementación de la regulación por PWM de la velocidad del motor y análisis de resultados

De forma general, la modulación por ancho de pulso, mejor conocido como PWM (Pulse Width Modulation, por sus siglas en inglés). Este método consiste en la variación del ciclo de trabajo (DC, duty cycle por sus siglas en inglés) y manteniendo el valor de la frecuencia constante. Cuando esta técnica es implementada en dispositivos electrónicos considera los siguientes aspectos:

a) Se debe tener un microcontrolador dedicado con pines PWM, los cuales son utilizados para generar las señales requeridas de forma precisa.
b) Se emplean los contadores y temporizadores propios del microcontrolador para crear la base de tiempo para generar la señal PWM.
c) Para configurar el ciclo de trabajo se configura un valor entre 0 y el máximo permitido por el temporizador del microcontrolador, en el caso del Arduino se tiene un temporizador de 8 bits lo cual corresponde con 255.
d) La salida PWM durante cada ciclo de trabajo del temporizador determina el tiempo de encendido y apagado de la señal.
e) La frecuencia y la resolución de la señal depende del tipo de temporizador, en este caso de 8 bits por lo que este rango esta entre 0 y 255.

Para este trabajo, el método de control de la velocidad del motor se realizó por medio de la modulación por ancho de pulso (PWM). De forma general, en la Figura 4 se presenta el esquema implementado para cumplir con el objetivo.

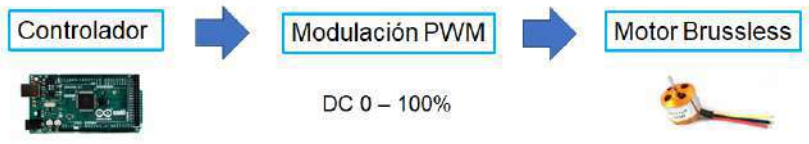


Figura 4. Esquema implementado para el control del motor de tipo Brushless.
Fuente: Autoría propia.

Para llevar a cabo el control de la velocidad del motor en el Spin Coater y por ende asegurar su adecuado funcionamiento, lo que garantiza la adecuada obtención de la película delgada, se requiere

de la implementación de una señal PWM, manteniendo un valor de frecuencia constante mientras que se logra hacer una variación de su ciclo del trabajo (DC), esto con el fin de que el motor incremente gradualmente la velocidad hasta alcanzar un valor máximo y mínimo de rpm, es decir, una señal con un valor de 0 V - 5V el cual corresponde con un DC de 0% - 100%.

Esta señal PWM es generada desde el Arduino MEGA, en el caso del motor Brushless la velocidad máxima requerida para la elaboración de la película delgada se mantiene fija a un valor máximo de 10000 rpm y un tiempo de duración del proceso de 30 segundos, de esta forma para el desarrollo de la programación se tienen las siguientes condiciones las cuales ya han sido obtenidas de forma experimental durante el desarrollo del prototipo. Estos valores traducidos al programa son interpretados mediante la función map() la cual toma valores de 0 a 255 correspondientes con valores de la señal PWM de 0V a 5V, en la Figura 5 se muestra un fragmento de dicho código.

Spin_Coater_LK.ino

```
1   //Librerias
2     //LCD
3     #include <LiquidCrystal_I2C.h>
4     #include <Wire.h> //Puertos MEGA: 20 (SDA), 21 (SCL)
5
6     //Teclado
7     #include <Keypad.h>
8
9     //Motor
10      #include <Servo.h>
11
12  //declaracion de las funciones de las librerias
13    //teclado
14      //definicion del numero de filas y columnas
15        const byte filas = 4;
16        const byte columnas = 4;
17
18      //definicion de los pines de las filas y columnas
19        byte pinsFilas[filas] = {30, 32, 34, 36};
20
21        byte pinsColumnas[columnas] = {22, 24, 26, 28};
22
23      //matriz de las teclas
24        char teclas[filas][columnas] = {
```

Figura 5. Programa desarrollado en la IDE de Arduino.
Fuente: Autoría propia.

Como ya se han detallado los parámetros de funcionamiento del motor ya han sido obtenidos experimentalmente durante las pruebas de validación del prototipo. Por lo que, el rango en el que trabaja adecuadamente corresponde con valores de 90 a 215, ya que con valores menores no es posible el arranque y un valor mayor provoca que las condiciones de operación sean inadecuadas. Por otro lado, otra condición a tomar en cuenta es la alimentación externa del motor ya que trabaja con un valor de voltaje de alimentación de 12V externo al microcontrolador, por lo que se hizo una relación entre la señal PWM de 0 a 5V con respecto a la del motor de 0 a 12V, estos corresponden con un DC del 84% y posteriormente reducirse a un valor próximo al 34% el cual corresponde con el mínimo para que el sistema funcione adecuadamente. De esta forma se obtuvo la siguiente relación:

a) El motor empieza a girar en un valor de DC del 34% correspondiente con 1.7V de la señal PWM.
b) El motor alcanza el máximo valor de rpm programadas (10000 rpm) ajustadas a un valor máximo del DC del 84% correspondiente con 4.2V de la señal PWM.

En la Figura 6 se presenta la medición obtenida del osciloscopio, en la cual se observan los valores obtenidos en las pruebas del motor Brushless sin carga.

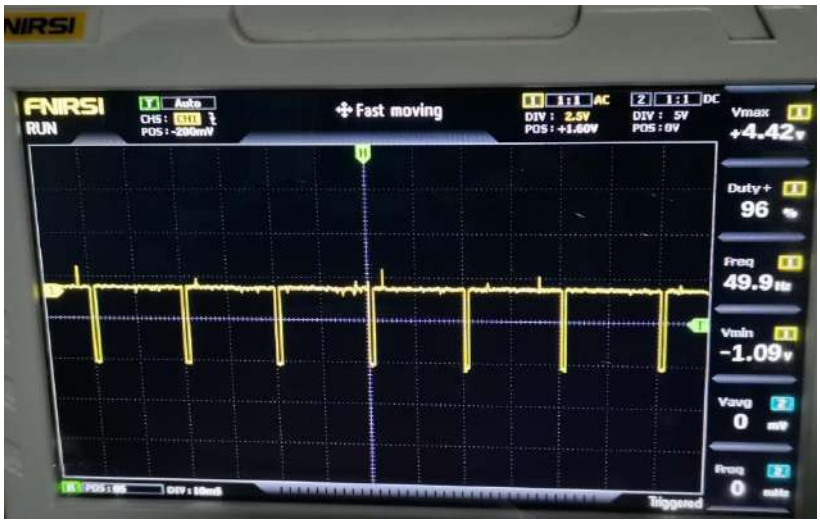


Figura 6. Señal PWM medida en el osciloscopio. Fuente: Autoría propia.

Como puede observarse en la Figura 6, la medición corresponde con el rango máximo obtenido y estimado previamente utilizando solo la IDE de Arduino en un ambiente totalmente virtual, el cual queda validado mediante la prueba y medición física del funcionamiento del motor, con lo cual queda demostrado que la implementación de la modulación PWM mediante la realización de la programación embebida en un Arduino MEGA es suficiente para que el prototipo cumpla con la fabricación de la película delgada.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se demostró que la modulación PWM es una técnica eficiente para el control de la velocidad de un motor tipo Brushless el cual se requiere variar la velocidad de giro desde un valor mínimo a un máximo durante un tiempo de 30 segundos, con el cual sea posible la obtención de un producto. Si bien la idea principal se centra única y exclusivamente en demostrar que el rango de operación requerido para la operación de un prototipo, el cual puede validarse mediante la implementación de esta técnica en una placa de desarrollo Arduino MEGA programado para obtener una señal de control que es enviada al motor y mantenerlo en las condiciones de funcionamiento requeridas.

Además, con estas pruebas de validación física es posible demostrar que un prototipo como el que se tiene desarrollado se puede controlar implementando un sistema de control embebido en un dispositivo electrónico lo que representa una opción viable en etapas iniciales de desarrollo.

Finalmente, una vez validada la eficiencia de esta técnica es posible implementar un control de tipo PD o PID por ejemplo, con el fin de poder enviar el valor del ciclo de trabajo directamente como una señal al motor eléctrico con lo cual es posible también obtener una señal más suave en el momento en el que puede medirse la señal de salida.

Referencias

[1] Delgado J., Bolaños C. “Control de velocidad para un motor DC Brushless sin sensores”. Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia, 2013.
[2] Bouat M. “Understanding the effect of PWM when controlling a Brushless DC Motor”, White papper, Portescap, pag. 1-8, 2021.

[3] Botet J. “Proyecto final de Carrera; Control de un motor Brushless”, Tesis de licenciatura, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2016.
[4] Morales J. “Control de velocidad de motores Brushless mediante modulación PWM”, Tesis de licenciatura, Universidad de Valladolid, España, 2018.
[5] Reyes S. “Control hibrido de motores DC sin escobillas usando FPGA”, Tesis de maestría, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, México, 2013.
[6] Cotte.J. Diseño de control robusto de velocidad de motores brushless para robótica aérea. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2010.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 13, pp. 150 – 163
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Propuesta de sistema mecatrónico para detectar errores en impresión 3D

Meza Martínez Luis Miguel, Rojas Cuevas Irma Delia, Mendoza Vázquez José Rafael y Sergio Javier Torres Méndez

Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Puebla.
Av. Tecnológico 420 Col. Maravillas. C.P. 72220 im22220009.62@puebla.tecnm.mx

Resumen

En este documento, se presenta la propuesta de un sistema mecatrónico para detectar errores en impresión 3D. El sistema mecatrónico se divide en los siguientes módulos: análisis del problema, determinación de requerimientos, selección de componentes, arquitectura del sistema, diseño del mecanismo y algoritmo para la detección del error. Se presentaron los antecedentes de las impresoras 3D y sus diferentes características y los tipos de tecnologías para la impresión 3D, de igual forma se describe la tecnología por deposición fundida y su forma de operación, además, se mencionan los trabajos que existen para la detección de errores en impresión 3D, como el software Printwatch que opera por medio de visión artificial. En el trabajo se expone el diseño del mecanismo como un prototipo del sistema mecánico. La arquitectura del sistema explica el funcionamiento de cada módulo a implementar en la propuesta de sistema mecatrónico para detectar errores en impresión 3D. A través de una cámara digital se obtienen las imágenes para su posterior procesamiento y análisis mediante la implementación de un algoritmo que permita la detección de error en las impresiones 3D. En caso de que el algoritmo detecte alguna irregularidad en la impresión 3D, se activara una alarma. El sistema también cuenta con un módulo mecánico que tiene un mecanismo diseñado para la cámara digital. El mecanismo será giratorio y autoajustable, con la finalidad de realizar las pruebas experimentales para la detección de los errores en las impresiones 3D. Finalmente se presentan los resultados obtenidos, las conclusiones y recomendaciones.

Palabras clave: *Detección* de error, adquisición de imágenes, impresión 3D.

1. Introducción

La impresión 3D o también conocida como la fabricación aditiva, es un proceso para la creación de objetos físicos tridimensionales a través de un diseño digital, los componentes de este tipo de impresión se pueden apreciar en la Figura 1.

La impresión 3D consta de la adición capa por capa de polímero para impresora 3D. Hoy en día existen diferentes tipos de máquinas 3D, y técnicas que se aplican para cada una en general, dependiendo del tipo y características de las impresoras. Extrusión de material, este tipo de máquina opera con la tecnología de modelado por deposición fundida (FDM), los materiales que trabaja son: PLA, ABS, PETG, TPU entre otros más. Polimerización VAT, este tipo de máquina opera con la tecnología de estereolitografía (SLA), estereolitografía enmascarada (MSLA), y el procesamiento digital de luz (DLP), el material que trabaja es la resina de fotopolímeros. Fusión en el lecho de polvo, este tipo de máquina opera con la tecnología de sinterizado selectivo por láser (SLS), fusión selectiva por láser (SLM) y la fusión de electrones (EBM), los materiales que trabajan son los polvos termoplásticos metálicos y cerámica [1].

La historia de las impresoras 3D tiene como pilar el proyecto REPRAP. En el año 2005 Adrian Bowyer (Bath University U.K.) crea el proyecto Open Source Replicating Rapid Prototyper (RepRap) con el fin de diseñar una máquina de prototipado rápido capaz de autorreplicarse. Tiempo más tarde (2008) se presenta el primer prototipo, llamado 'Darwin', el cual prototipó piezas para la construcción de una nueva impresora, éste dio pauta a la creación de auto replicas con mejoras continuas hasta la actualidad [2].

Dentro de los principales sistemas de prototipado por aditivo, se encuentra el modelado por deposición fundida o FDM. Éste fue creado por Scott Crump y vendido por la empresa Stratasys en 1991. Se basa en una cama en movimiento vertical, trabajando en los ejes X, Y; el cabezal funciona como extrusor, depositando filamento (termoplásticos), calentando el sistema de extrusión hasta derretirlo. Este proceso crea la figura creando una capa sobre otra hasta la obtener una figura tridimensional [3].

Existen diferentes condiciones para detectar los errores de impresión 3D que utilizan la tecnología de FDM. Estos errores se clasifican como errores de parametrización de software y errores físicos. Dentro de los errores físicos más comunes se encuentran: desnivelación de cama, impurezas de filamento, atasco de sistema de extrusión. Mientras que el más común en parametrización de software es la parametrización incorrecta en el diseño CAD.

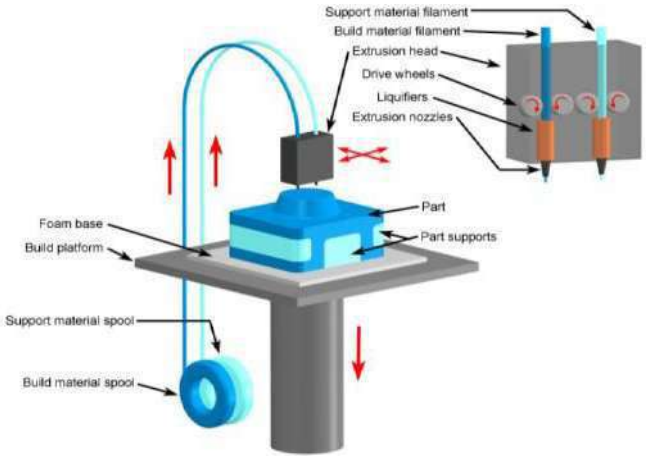


Figura 1. Sistema de Impresora 3D [4].

La tecnología FDM inicia con una idea de impresión, a partir de ella se elabora un diseño CAD, el cual es traducido a un sistema de enmallado, obteniendo un archivo con extensión, STL, posteriormente se realiza la parametrización de la pieza para poder empezar a imprimirla, este proceso se muestra en la Figura 2.

Para la tecnología FDM existen diferentes tipos de impresoras 3D. Las impresoras cartesianas, que trabajan con un sistema de coordenadas X, Y, Z. Las impresoras polares, que utilizan coordenadas polares para imprimir, teniendo los conjuntos de coordenadas en una cuadricula circular en vez de cuadrada.

Las impresoras delta, que trabajan con coordenadas cartesianas, teniendo 3 sistemas mecánicos en uno, para el sistema de extrusión [5]. En la actualidad existen trabajos referentes al sensado de impresión 3D para la detección de los objetos, tal es el caso de PrintWatch que es un complemento del software OctoPrint. Éste tiene una interfaz visual y de control que permite el monitoreo de impresiones 3D utilizando inteligencia artificial, siendo una plataforma de control remoto, que sirve para detectar la falla de una impresión, mandando una notificación para tomar la decisión más adecuada para el tipo de error que se presente, cabe destacar que esta interfaz fue creada recientemente 2022 [6].

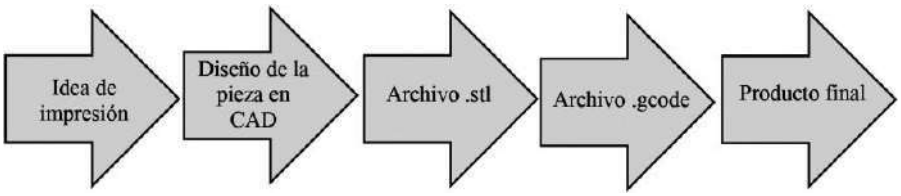


Figura 2. Diagrama de proceso de la adición aditiva 3D [7].

2. Metodología

La metodología implementada para el sistema mecatrónico consta de seis pasos. El análisis del problema, que comprende los antecedentes de los errores de impresión 3D utilizando la tecnología por deposición fundida. La determinación de requerimientos que consiste en analizar que requiere el sistema para funcionar y los atributos de calidad del sistema. La selección de componentes implica la selección de los elementos necesarios para la construcción del sistema. La arquitectura del sistema describe la integración de los diferentes módulos que conforman el sistema para su funcionamiento. El diseño del mecanismo muestra la integración de las piezas mecánicas. El algoritmo para la detección del error muestra el procedimiento mediante el cual el sistema va a detectar que existe un error de impresión en la pieza creada, esta metodología se puede apreciar en la Figura 3.

Figura 3. Diagrama de la metodología, fuente: elaboración propia.

2.1 Análisis del problema

En el caso de la impresión 3D, los errores pueden ocurrir durante el proceso de fabricación y pueden clasificarse como errores de parametrización de software y errores físicos. Los defectos de impresión más comunes en las impresoras FDM son:

- Irregularidad en impresión 3D, se observa que la pieza que no cumple con las características geométricas del diseño presenta huecos o deformaciones, debido a la parametrización incorrecta del software o a condiciones de incorrectas de temperatura.
- Desnivelación de cama, este error causa la impresión incorrecta de la pieza y produce errores de desfase, normalmente este error suele deberse a la falta de calibración de la cama por medio de las tuercas o al desajuste del sensor de auto nivelación.
- Atasco del sistema de extrusión, éste se produce debido al atasco del filamento en el sistema de extrusión, debido a impurezas del filamento.
- Error por sistema de extrusión, este problema surge debido al desgaste de algunos componentes del sistema de extrusión (engranes, baleros etc.).
- Errores de deformación, ocurren por la falta de soportes o por impresión en voladizo.
- Errores de procesamiento, ocasionan la obtención de piezas irregulares, estos se presentan debido a la parametrización incorrecta del diseño CAD [8].

En la Figura 4 se presentan los principales errores en impresión FDM, en sus dos más grandes clasificaciones.

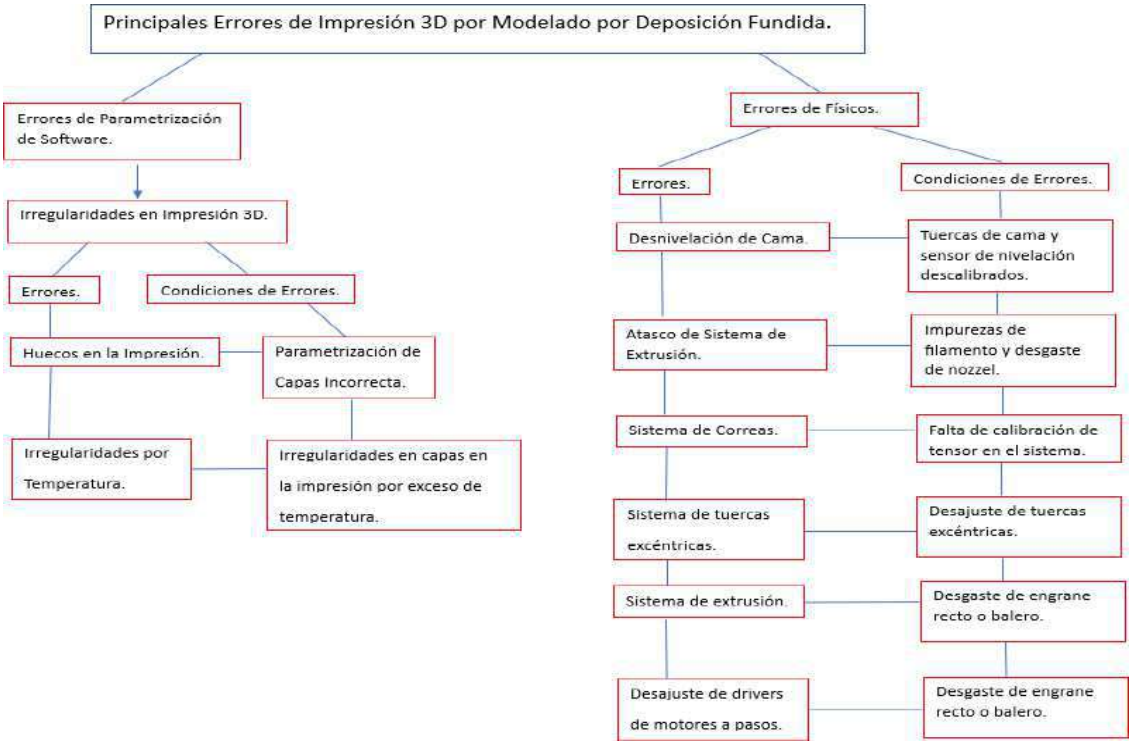


Figura 4. Problemas de impresión 3D, aplicados a la tecnología FDM, fuente: elaboración propia.

2.2 Determinación de requerimientos.

Los requerimientos funcionales del sistema son:

- Sistema de iluminación. Se requiere los módulos led's 5050 de 2.5 watts, por módulo con la finalidad de tener un buen contraste e iluminación eficiente para obtener buenas resoluciones de imágenes [9].
- Adquisición de imagen. Se requiere una cámara digital, para poder realizar la captación de imágenes.
- Módulo mecánico. En este módulo se requiere de un mecanismo para el monitoreo de la cámara digital.
- Módulo de control mecánico. En este módulo se necesita la tarjeta de desarrollo Skr 1.3 para el control de motores del mecanismo.

Aviso de falla. Se requiere de la extracción de patrones y características del error en impresión 3D, para el desarrollo del algoritmo y la activación de la alarma.

- Sistema para detección de falla. En este punto se requiere una computadora para la programación del sistema.

2.3 Selección de componentes.

En el siguiente listado, se describen los componentes que se emplean para el desarrollo del sistema mecatrónico.

A) Computadora tipo laptop HP Pavilion con un procesador AMD RYZEN 5000 SERIES 7, donde se desarrollará el algoritmo para la adquisición y procesamiento de imágenes en el software Python, complementado con librerías (OpenCV, entre otras más)
B) Raspberry Pi Model B+, una vez desarrollado el algoritmo en el servidor de la laptop se pretende trasladarlo a este sistema.
C) Tarjeta de desarrollo Skr 1.3 para impresora 3D, esta placa permitirá controlar los motores que se usan en el mecanismo para el movimiento de la cámara.
D) Arduino NANO se usa para realizar el sistema de iluminación para la estructura cerrada de la impresora 3D.
E) Impresora 3D CR-10 S5, es la máquina de impresión 3D donde se imprimen las piezas en formato 3D.
F) Cámara digital LifeCam Studio de Microsoft, definición de 1080 pixeles HD, rotación 360°, con esta cámara se realizará la captación y adquisición de imágenes de las impresiones 3D.
G) Fuente de alimentación, con esta fuente de alimentación de 24v y 15 amperes, se suministrará la potencia para alimentar la tarjeta y los motores que se utilizarán para el mecanismo del sistema.
H) Motores Nema 17 para impresora 3D, se implementarán para desarrollar el mecanismo para la arquitectura de la impresora 3D.
I) Perfiles de aluminio de 20x20 mm, con estos perfiles se construirá la estructura cerrada para la impresora y el sistema de monitoreo de la cámara.
J) Módulos LED's, con estos módulos se implementará el sistema de iluminación que estará integrado en la estructura cerrada para la impresora 3D.
K) Módulo de potenciómetro, este módulo permitirá por medio de un programa NANO controlar la luminosidad del sistema de iluminación para la estructura cerrada.
L) Filamento para impresión 3D tipo PLA, con el filamento se realizarán las pruebas experimentales de impresiones para captar los errores, más aparte se utilizará para la fabricación de algunos acoplamientos de la estructura cerrada.
M) Cortes en acrílico, serán utilizados para la construcción de la estructura cerrada junto con los acoplamientos y los perfiles estructurales.

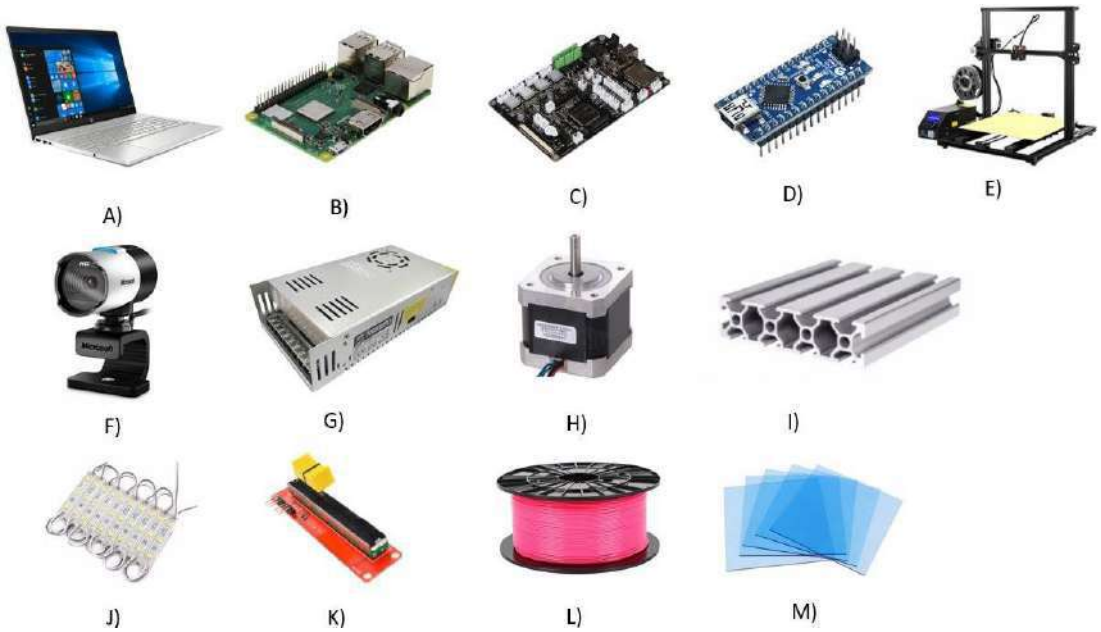


Figura 5. Componentes seleccionados para la arquitectura del sistema, fuente: elaboración propia.

2.4 Arquitectura del sistema.

La arquitectura del sistema se divide en los siguientes módulos:

a) Adquisición, se utiliza una cámara web para la adquisición de imágenes de las impresiones 3D.

b) Procesamiento, una vez adquiridas las imágenes se procesarán por medio del software programado en Python.

c) Detección de error, se desarrollará y programará en Python un algoritmo que detecte irregularidades en la impresión 3D por medio de las imágenes adquiridas.

d) Aviso de falla, se desarrollará un algoritmo de aviso o haga un paro en caso de detectar algún error.

e) Módulo mecánico, el sistema tendrá un mecanismo móvil donde se instalará la cámara digital.

f) Módulo de control mecánico, controlará los motores nema a través de la tarjeta Skr para control de impresoras 3D.

g) Módulo de iluminación, se implementará un sistema de iluminación de leds para la estructura cerrada de la impresora 3D donde se desarrollarán las pruebas experimentales.

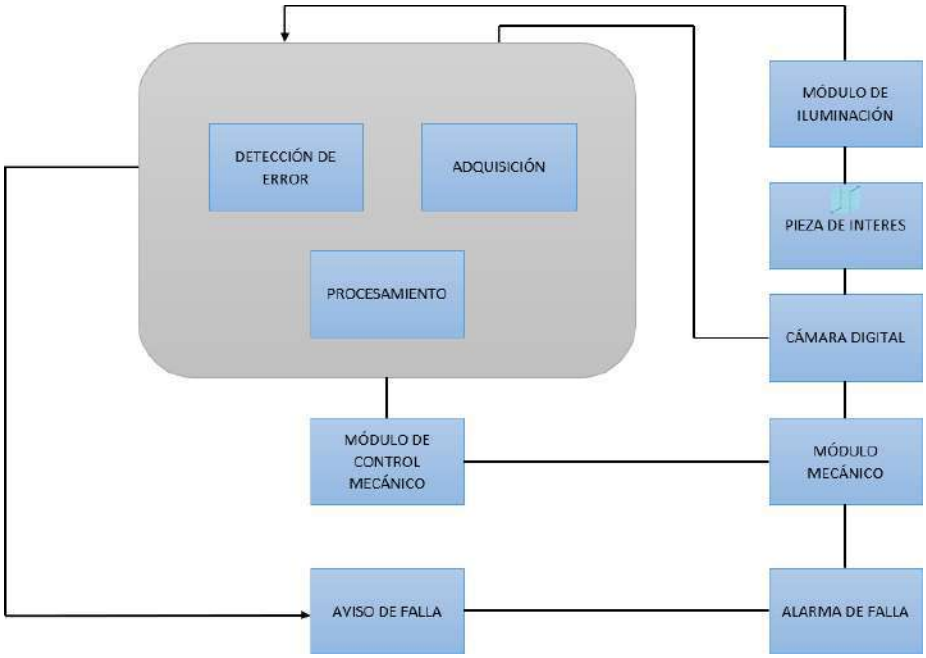


Figura 6. Arquitectura del sistema, fuente: elaboración propia.

2.5 Diseño del Mecanismo

El mecanismo prototipo fue diseñado en el software SolidWorks versión 2018, en la tabla 1 y tabla 2 de muestran los componentes mecánicos que se implementaron en el mecanismo con su descripción del componente. Diseño del mecanismo para la captura de imágenes de la impresión 3D.

Cabe mencionar que en esta etapa de diseño del mecanismo se está evaluando en el eje Z, para tomar la captura de imágenes, con respecto a los avances porcentuales que se implementaran en el eje Z.

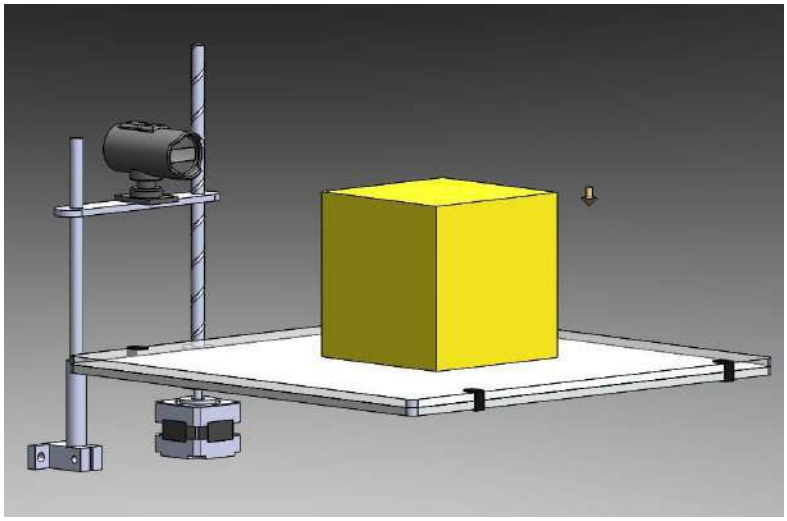
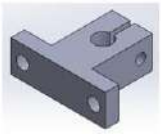
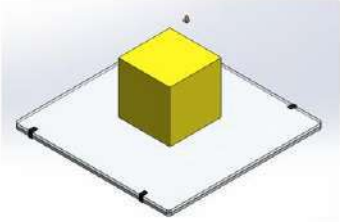


Figura 7. Mecanismo para la captura de imágenes de la impresión 3D.

Tabla 1. Componentes del mecanismo parte 1, fuente: elaboración propia.

Nombre de la Pieza	Imagen	Descripción
Cámara Web		Cámara Web, diseño CAD de la cámara que realizara la captura de las impresiones 3D.
Motor Nema		Diseño CAD del motor Nema a implementar en el mecanismo.
Eje Lineal		Diseño CAD de eje lineal guía para el mecanismo.
Eje sinfín		Diseño CAD de eje sinfín que transmitirá el movimiento por medio del motor Nema.

Tabla 2 Componentes del mecanismo parte 2, fuente: elaboración propia.

Cople de eje lineal		Diseño CAD del coplee para el eje lineal.
Soporte de cámara		Diseño CAD del soporte para el mecanismo y la cámara web.
SubEnsamble de la cama de la impresora 3D, pieza cuadrada y boquilla.		Diseño CAD del ensamble de la cama de la impresora 3D y la impresión del cubo representativo para la captación de imágenes.

Se presentan las etapas de la captación de imagen por medio de la cámara web a la impresión 3D, presentando un avance en caso de que sea correcta la impresión, los rangos de avance estarán definidos al 25 %, 50 %, 75 % y 100 %, representados en las figuras-- los avances del mecanismo de la cámara.

Inicialización de mecanismo proyectado al 0 % de avance, para la captura de imagen en la impresión 3D.

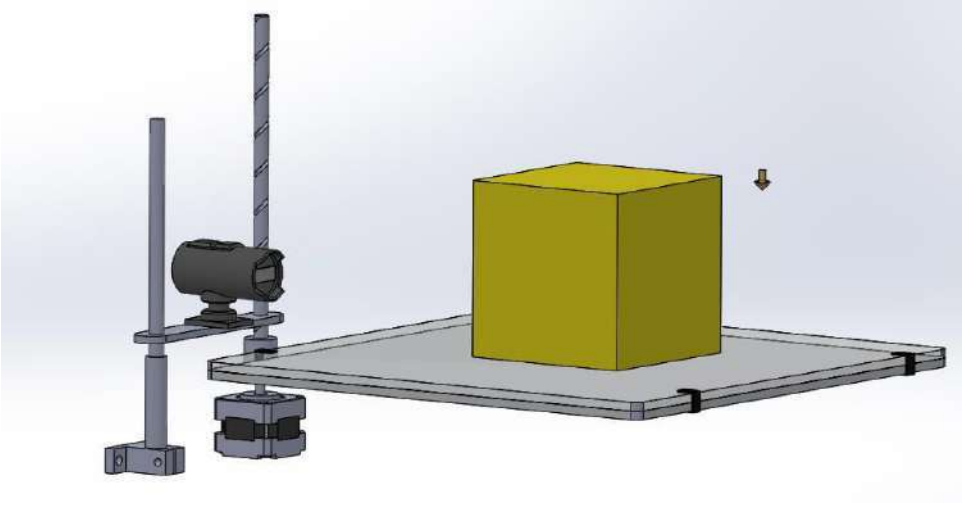


Figura 8. inicialización del mecanismo al 0 %, fuente: elaboración propia.

Avance de trayectoria del mecanismo al 25% para la captura de imagen de la impresión 3D.

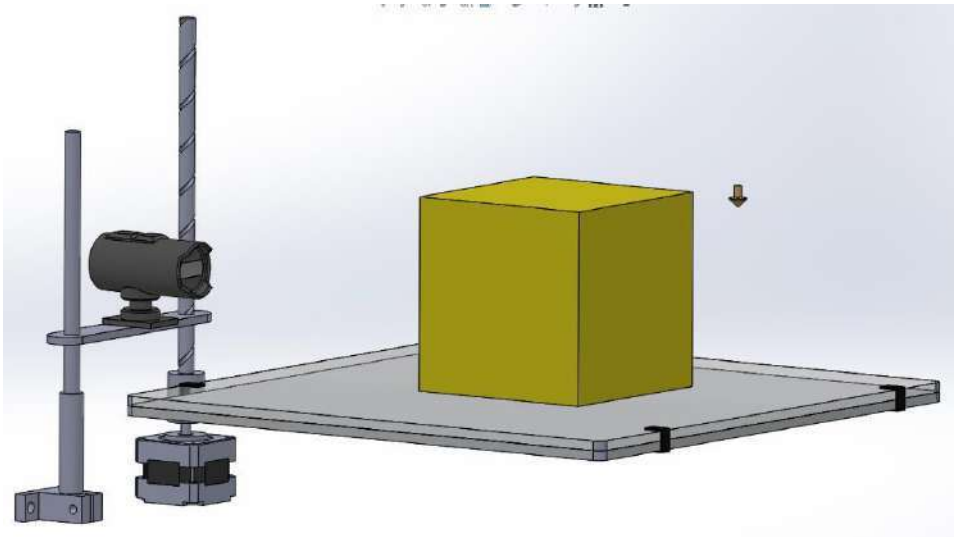


Figura 9. Avance del mecanismo al 25 %, fuente: elaboración propia.

Avance de trayectoria del mecanismo al 50% para la captura de imagen de la impresión 3D.

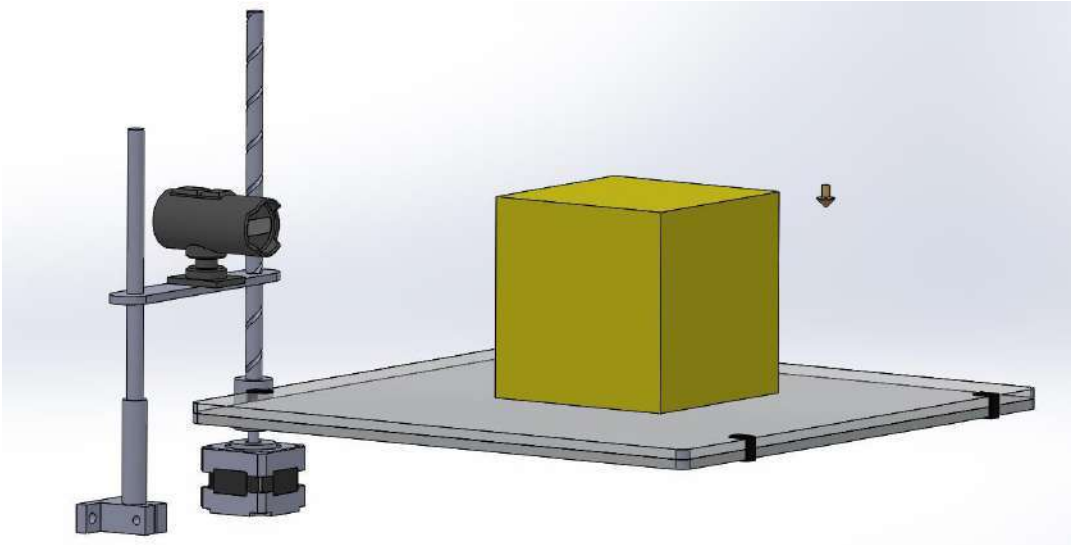


Figura 10. Avance del mecanismo al 50 %, fuente: elaboración propia.

Avance de trayectoria del mecanismo al 75% para la captura de imagen de la impresión 3D.

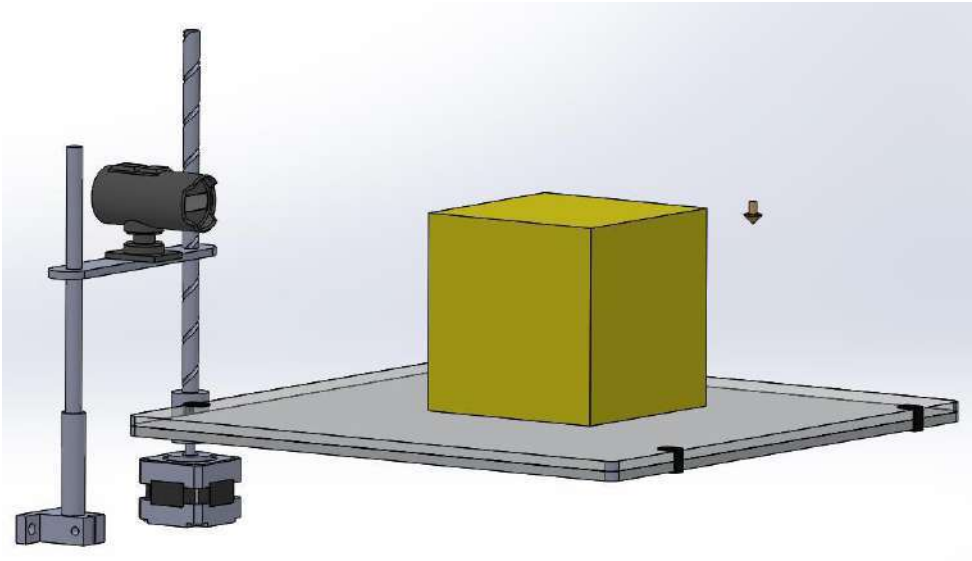


Figura 11. Avance del mecanismo al 75 %, fuente: elaboración propia.

Avance de trayectoria del mecanismo al 100 %, lo cual indica que no hubiese ninguna falla en la impresión 3D, finalizando la impresión 3D de forma correcta.

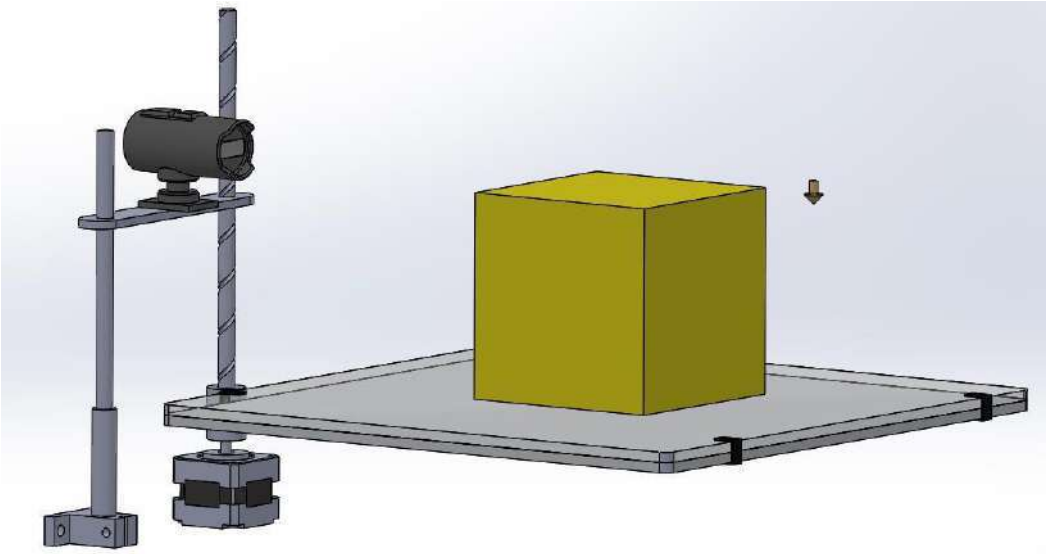


Figura 12. Avance del mecanismo al 100 %, fuente: elaboración propia.

Representación de la explosión del diseño mecánico, a continuación, en la figura 13 se presenta la explosión de mecanismo de la cámara web para la captación de imágenes de impresiones 3D, y en la tabla 3, se muestran los elementos mecánicos del mecanismo.

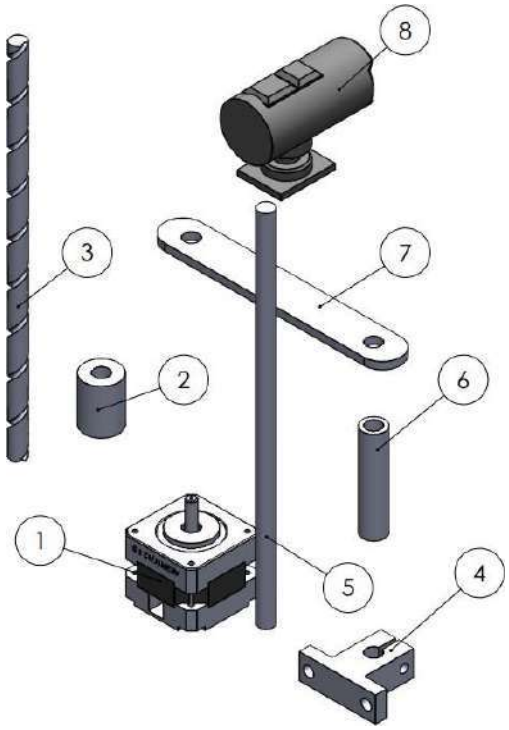


Figura 13. Explosión del diseño mecánico, fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Componentes mecánicos del mecanismo para la captación de imágenes de la cámara para las impresiones 3D, fuente: elaboración propia.

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Motor Nema 17	Motor eléctrico Nema.	1
2	Cople sin fin	Cople para eje sin fin y motor Nema.	1
3	Eje sin fin	Eje sin fin para acoplamiento del motor Nema.	1
4	Base eje líneal	Base para el eje líneal ajustado.	1
5	Eje líneal guia	Eje líneal guia para el funcionamiento del mecanismo.	1
6	Aumento eje	Aumento para eje líneal.	1
7	Base cámara	Base para acoplar la cámara	1
8	Cámara microsoft	Diseño CAD de cámara web	1

Se presenta los componentes físicos para el desarrollo del mecanismo para la captura de impresión 3D, el cual contiene: el motor nema, eje guía línea, buje guía, coplee de eje sinfín, coplee de eje línea, acoplamiento elevación.

Figura 14. Mecanismo físico, para la captación de imágenes de impresión 3D, fuente: elaboración propia.

2.6 Algoritmo para la detección de error.

Para el sistema mecatrónico, se emplea el siguiente algoritmo para la detección de errores. La primera consiste en la captura de imágenes y su preparación para obtener el valor o índice a comparar con la información inicial. Este valor permite definir la siguiente acción, que comprende definir si la impresión es correcta, si es correcta a cada avance la impresión en el 25%, 50%, 75% se van obteniendo nuevas imágenes para validar el proceso de impresión. En la segunda sección en caso de que el algoritmo detecte error en la impresión se va a la sección de registro de error y se emite la alarma correspondiente para el paro del proceso de impresión.

A continuación, se presenta el algoritmo para este proceso.

Algoritmo para detección de error

```
Inicializar variables (ciclo=0, Tiempo=hora_actual, xTiempo=Espera, alarma=0)
Cargar patrón de referencia de la impresión
Mientras ciclo<=3
Capturar imagen de la impresión 3D física
Pre-procesamiento imagen física a formato adecuado
Extracción de patrón de la imagen física
Comparar patrón de referencia con patrón de imagen física y obtener índice
Si índice >90%
ciclo+=1
Tiempo=Tiempo+xTiempo
De lo contrario
alarma=1
```

3. Resultados

La propuesta del sistema mecatrónico para detectar errores en impresiones 3D tiene como resultado una metodología con las siguientes divisiones; (análisis del problema, determinación de requerimientos, selección de componentes, arquitectura del sistema, diseño del mecanismo y algoritmo para la detección de error). Se realizó el diseño del prototipo del mecanismo, que se implementará en la estructura cerrada para la impresora 3D.

La arquitectura del sistema muestra como el sistema mecatrónico combina componentes, mecánicos, electrónicos, y de software para mejorar la calidad y la precisión de la impresión 3D y así detectar errores de manera eficiente. La arquitectura del sistema se pueden desarrollar los módulos en orden secuencial siguiendo la arquitectura planteada. De igual forma este sistema mecatrónico puede ser implementado en partes, ya que es un sistema de integración.

El sistema puede ser implementado para detectar los errores al momento en que se está realizando la impresión 3D, de modo que cuando se tenga un avance de un 20% la cámara obtenga imágenes, la primera de ellas del lado derecho, avance al centro (con ayuda del sistema de control mecánico y la plataforma mecánica) al centro y posteriormente al lado izquierdo. Una vez adquiridas las imágenes, realice el procesamiento de las imágenes para encontrar errores, de encontrar algún error deberá emitir una alarma, de lo contrario, esperará cuando el sistema avance al 40% para repetir el proceso y finalmente lo repetirá cuando haya un avance del 60%. Los porcentajes de avance serán calculados con base al tiempo que debe llevar la elaboración de la pieza y serán calculados por un programa desarrollado en Python.

En la tabla 1, se describe los resultados de la arquitectura para la detección de impresión 3D que comprende las divisiones de la arquitectura del sistema.

Tabla 4. Resultados de la arquitectura del sistema.

No.	Descripción	Resultado
1	Determinación de requerimientos	Requerimientos funcionales: módulo de iluminación led's, mecanismo para la cámara digital, estructura cerrada para la impresora 3D.
2	Selección de componentes	Componentes seleccionados.
3	Metodología aplicada para la arquitectura	Módulos de la arquitectura del sistema.
4	Diseño del mecanismo	Piezas del mecanismo, ensamble del mecanismo propuesto.
5	Análisis de la problemática del sistema	Errores principales de las impresiones 3D utilizando la tecnología FDM.
6	Algoritmo para la detección de error	Requerimientos del algoritmo: captación de imagen, adquisición y procesamiento de imagen, extracción de patrones y caracteres, aviso de falla de error.

4. Conclusiones

Se seleccionaron los componentes para un sistema mecatrónico que permite la detección de error en la impresión 3D. Se diseño un sistema para el manejo de la cámara a fin de lograr la posición adecuada empleando CAD. Se determinó el algoritmo para el análisis de imágenes que permita el proceso de detección de errores en la impresión 3D. Se obtuvo la arquitectura del sistema mecatrónico para la detección de errores en impresión 3D. Se desarrollo una propuesta de sistema mecatrónico para la detección de errores en la impresión 3D.

El desarrollo de un sistema de esta naturaleza ayudará a evitar desperdicios de material en impresiones 3D y permitirá obtener desarrollos económicos en este ámbito de la impresión 3D que cada día es más utilizada para prototipados rápidos en diversas áreas

5. Recomendaciones

Se recomienda que para este tipo de sistema de disponga de condiciones adecuadas de iluminación que permitan disponer de imágenes con las mismas condiciones para su análisis. Se recomienda que para la implementación de este tipo de sistema se desarrolle en computadora los procesos y en forma posterior se migre a un sistema embebido para garantizar el funcionamiento de todos los procesos.

Referencias

[1] E. P. V. CENTRES, «Guia Técnica de Impresíon 3D,» Co-funded by the Eramus+ Programme of the European Union, España, 2017.

[2] M. M. Calvete, «Caracterizacion de errores de fabricación en impresora 3D de bajo coste y rediseño de la misma para minimizar dichos errores.,» Muñiz Calvete,M. 2013 Caracterizacion de errores de fabricación en impresora 3D de bajo coste y rediseño de la misma para minimizar dichos errores., España, 2013.

[3] E. T. D. Jersson Xavier León Medina, «Diseño de un prototipo de impresora 3D que aplica a la técnica de prototipado rápido modelado por deposición fundida.,» León Medina, J,X. Torres, Diáz, E. 2013 Diseño de un prototipo de impresora 3D que aplica a la técnica de prototipado rápido modelado por deposición fundida., Colombia, 2013.

[4] R. B. García, «Diseño de una impresora 3D capaz de crear múltiples objetos simultáneamente,» Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, Madrid, 2013.

[5] S. U. d. E. T. d. l. R. Argentina, «Tipos de impresoras 3D FDM: Delta, Cartesianas, Polar y Brazo robótico.,» S.U.E.T.R.A. 2019, Tipos de impresoras 3D FDM: Delta, Cartesianas, Polar y Brazo robótico., Argentina, 2019.

[6] P. Lebiedzinski, «printpal.io,» 27 Enero 2022. [En línea]. Available: https://printpal.io/documentation/printwatch-official-release. [Último acceso: 10 Junio 2023].

[7] Á. S. A. Alba Cano Vicent, «Impresión 3D por modelado por deposición fundida: Manejo, funcionamiento y aplicaciones biomédicas.,» ResearchGate, Valencia, 2021.

[8] X. S. Kaixin Cui, «Una especie de método de mejora de la precisión basado en Análisis de errores y comentarios para la impresión 3D DLP,» Cui,K. Shang,X. 2017, Una especie de método de mejora de la precisión basado en Análisis de errores y comentarios para la impresión 3D DLP, China, 2017.

[9] Vision On Line, «Visión artificial con valor añadido,» [En línea]. Available: www.visiononline.es. [Último acceso: 11 Junio 2023].

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 14, pp. 164 – 175
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Diseño y comparación de CCN para tareas de reconocimiento en la clasificación del grado de madurez de tomates.

Guerrero Flores Jose Rosario[1], Olvera Olvera Carlos Alberto[1], Díaz Flórez Germán[1], Guerrero Osuna Héctor Alonso[1] y Solís Sánchez Luis Octavio[1]

[1]Posgrado en Ingeniería y Tecnología Aplicada
Universidad Autónoma de Zacatecas
Jardín Juárez #147, Col Centro C.P. 98000, Zacatecas, Zacatecas, México.
38192202@uaz.edu.mx

Resumen

Este proyecto de investigación y desarrollo tecnológico presenta el desarrollo y funcionamiento de una red neuronal convolucional (CNN) para la detección y clasificación de tomates en cultivos agrícolas. La cual detecta la presencia de objetos con similitudes físicas especificas del objeto de interés de una imagen y otorga herramientas para segmentar los objetos de interés, delimitando el perímetro y etiquetándolos. La red asigna una clase al objeto según su estado de maduración, que puede ser "Tomate maduro", "Tomate no maduro" y "Tomate en mal estado"*. Para lograr un mejor control en los tiempos de trabajo al aplicar este método y reducir la intervención humana en el conteo y reconocimiento de hortalizas para minimizar los errores de este tipo. Para comprobar la funcionalidad del sistema se realizó un caso de estudio donde se probó la red entrenada en la detección con nuevas imágenes, distintas a las del conjunto de datos usado para entrenar la red y poder evaluar su comportamiento en situaciones reales. Los resultados muestran que el modelo clasifica correctamente alrededor del 79.2% y detecta correctamente alrededor del 83% de todas las muestras positivas presentes en los datos.*

Palabras clave: Red neuronal convolucional, Segmentación, Hortaliza

1. Introducción

La agricultura es una actividad fundamental para el bienestar de la humanidad, pues proporciona alimentos y materias primas que son esenciales para la vida. La agricultura tiene un papel clave en el desarrollo económico y social de los países, pues genera empleo, ingresos y oportunidades para millones de personas. La agricultura también es un factor importante para la conservación del medio ambiente, además, favorece la diversidad biológica y el uso sostenible de los recursos naturales. La agricultura es uno de los sectores primarios más relevantes a nivel mundial, pues aporta en gran medida al nivel económico de las entidades ya que muchas familias dependen de la producción agrícola para obtener ingresos y satisfacer sus necesidades básicas [1, 2].

El cultivo del tomate es una de las actividades que tiene una gran importancia en el mundo, ya que se trata de una hortaliza muy apreciada por sus propiedades nutricionales y su variedad de usos gastronómicos. No obstante, el tomate es un cultivo exigente que necesita de unas condiciones óptimas de manejo, protección fitosanitaria y eficiencia en el uso del agua y la energía. El tomate es un cultivo que demanda mucha dedicación y esmero, pero que también brinda grandes beneficios a los productores y consumidores [3].

El consumo mundial de esta hortaliza ha crecido mucho en los últimos años, lo que implica un desafío para los productores, que deben asegurar la calidad y la inocuidad de sus productos. Para

lograrlo, es imprescindible emplear buenas prácticas de cultivo, prevenir las plagas y enfermedades, y aprovechar los recursos hídricos y energéticos de forma eficiente. Por eso, el cultivo de tomate en invernadero se ha vuelto una opción cada vez más popular entre los productores, ya que les permite atender la creciente demanda del mercado y reducir los riesgos asociados al cultivo al aire libre. Entre estos riesgos se encuentran la mayor vulnerabilidad a las plagas, que pueden afectar la calidad y el rendimiento de los tomates, y la dificultad para manejar las condiciones ambientales y el estado de las plantas [4].

La protección de los cultivos frente a las plagas, enfermedades y malas condiciones es una cuestión esencial para los agricultores, ya que estos factores pueden reducir drásticamente el rendimiento y la calidad de la cosecha, con el consiguiente impacto económico negativo. Por eso, es necesario implementar medidas agroecológicas que eviten y combatan las infestaciones de los organismos perjudiciales, sin depender de productos químicos que puedan ser nocivos para la salud y el medio ambiente. En especial, las plagas de insectos son una de las mayores amenazas para los cultivos, pues los insectos se nutren de las hojas, tallos y frutos de las plantas, y además algunas plagas pueden ser vectores de enfermedades que afecten a las plantas, provocando una mayor pérdida de la cosecha. Ya que las enfermedades pueden interferir con varios procesos vitales, como la captación y transporte de agua y nutrientes, la fotosíntesis y el desarrollo o crecimiento de toda la planta [5].

Otro reto en la actualidad es que el aumento de enfermedades que afectan a los cultivos y que son difíciles de controlar o erradicar. Esto se debe a que las plagas han desarrollado una mayor tolerancia a los insecticidas y una mayor adaptación a las condiciones ambientales adversas, debido a factores como el cambio climático y el uso excesivo o innecesario de pesticidas. Estos métodos agrícolas inapropiados hacen que las plagas se vuelvan más resistentes a los tratamientos convencionales, lo que obliga a usar más cantidad o variedad de pesticidas o insecticidas, pero esto puede dañar la calidad del producto o volverlo no apto para el consumo [6].

Las hojas son los indicadores más fiables del estado de las plantas, ya que son las partes más visibles y muestran si están sanas o estresadas. Por lo tanto, es fundamental prestarles atención y detectar cualquier problema que pueda comprometer el crecimiento vegetal [7].

Es importante detectar a tiempo las plagas o enfermedades que puedan atacar a los cultivos, para evitar que se propaguen y causen daños irreversibles. Así mismo, se debe reducir el uso de químicos que puedan tener efectos negativos en la calidad y el rendimiento de los productos agrícolas [4, 8].

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. Mediante el uso de técnicas de análisis de imágenes, se pueden identificar los cultivos y detectar factores externos, enfermedades, carencias de nutrientes o el abuso de soluciones químicas. Esto facilita una gestión más eficaz y precisa de los recursos y una mayor posibilidad de prevenir y tratar problemas en los cultivos [9, 10].

2. Trabajos Relacionados

En esta sección se presentan algunos de los trabajos que se han implementado para el uso de redes convolucionales para la detección de características físicas en cultivos y cuales fueron sus influencias en el desarrollo de este trabajo.

En el trabajo presentado en [11] se utiliza un sistema basado en una red neuronal convolucional para monitorear el estado de los cultivos mediante el análisis en las variaciones de los espectros de color. El algoritmo de procesamiento de imágenes es capaz de identificar las zonas afectadas por plagas, enfermedades o estrés hídrico, una vez detectadas las anormalidades se envían alertas al usuario a través de una aplicación móvil. Las alertas nos indican si hay variaciones en el color de las plantas, lo cual puede afectar su salud y rendimiento. Por eso, es conveniente clasificar las plantas en

diferentes categorías según su tonalidad, para poder identificar rápidamente el problema y tomar medidas al recibir la alerta [12].

También en [3] se utiliza la delimitación de objetos presentes ya que es muy útil en la detección con el fin de tener un conteo en los cultivos. Esto permite estimar el nivel de infestación y el impacto en la producción. Además, se puede aplicar un procesamiento posterior para clasificar los tipos de plagas y determinar las medidas de control más adecuadas.

Con el conteo y clasificación de cada objeto presente en los cultivos se puede tener un mejor control del cultivo ya sea en exteriores o invernaderos, aunque estos dos espacios puedan presentar condiciones climáticas y agentes externos distintos es posible llevar un correcto manejo de los recursos, como se realiza en [14].

La tecnología del "Internet de las cosas" permite conectar dispositivos físicos a redes inalámbricas para intercambiar información y datos. En [15] se utiliza esta tecnología puede facilitar el monitoreo de diferentes procesos y sistemas, ya que ofrece la posibilidad de procesar imágenes y gestionar el sistema integrado de forma más eficiente y funcional.

3. Materiales Y Métodos

Roboflow es una plataforma de inteligencia artificial diseñada para facilitar la construcción, entrenamiento, prueba y despliegue de modelos de visión artificial por ordenador. Gracias a su sencilla carga de imágenes, compatibilidades con diversas bases de datos, implementación rápida de modelos y capacidad de integración en diferentes etapas de proceso fue utilizada con un enfoque en la agricultura, más específicamente en la detección de tomates y su clasificación. Para ello es necesaria la de una cuenta con el correo institucional para poder realizar la creación de modelos y tener acceso a distintas pruebas de entrenamiento, validación y prueba en ella, además de poder obtener resultados de los parámetros obtenidos en el modelo para su fácil entendimiento y el cómo se puede mejorar la red y determinar si es eficiente para el trabajo que se está destinada a desempeñar.

Para realizar en entrenamiento de la red es necesario llenar los bancos de imágenes que se tomaran como referencia para determinar el objeto que se detectara, por lo que se utilizara un total de 151 imágenes de tomates, las cuales se segmentaran y agruparan en distintas clases para su organización y diferenciar los distintos estados en los que se puede encontrar un tomate.

A estas imágenes se les aplicara un aumento de datos, el cual utiliza técnicas de oversampling para tener muestras “ficticias” que sigan las mismas características estadísticas de la muestra original (recortar, redimensionar el tamaño, rotar, cambiar a escalas de grises, etc.) y así entrenar los algoritmos con más datos. Una vez procesadas las imágenes estas se dividirán en distintos porcentajes, de modo que el conjunto de entrenamiento y el conjunto de prueba tengan una proporción determinada, y este último se subdivida en dos conjuntos más, el de validación y el de prueba, esto en 3 formas para poder observar el comportamiento de la red en 3 situaciones distintas, las cuales se nombrarán “V1”, “V2” y “V3”.

Tabla 1. Valores de entrenamiento.

Red	Entrenamiento	Validación	Prueba
V1	70%	20%	10%
V2	65%	15%	20%
V3	80%	10%	10%

Posteriormente se configura el tamaño del modelo. Esto afecta el comportamiento del modelo, ya que, a mayor tamaño, mayor cantidad de datos se utilizarán para entrenarlo. Sin embargo, nuestra versión universitaria solo nos permite escoger entre las opciones de “2x” y “3x”, que corresponden al

factor multiplicativo del conjunto de datos original. Cabe destacar que algunas imágenes pueden ser descartadas por el modelo si se consideran como “Filtro nulo”, es decir, si su calidad o procesamiento impiden una correcta identificación de las características.

Estos modelos después se podrán implementar en Google Colab que es servicio gratuito de computación en la nube que no requiere instalar ningún software o hardware adicional. Google Colab nos ofrece el uso de GPU y TPU de Google para entrenar y probar nuestros modelos, así como la opción de conectar el servicio con nuestra cuenta de Google Drive para usar el sistema de archivos para guardar y manejar los datos o modelos generados. Y utilizar YOLOv5 que es una técnica avanzada de visión por computadora que permite reconocer y ubicar objetos en imágenes o vídeos con gran precisión y velocidad. El nombre “YOLO” proviene de las iniciales en inglés de “You Only Look Once”, lo que indica que el algoritmo solo necesita analizar una vez la imagen para hallar los objetos presentes, sin recurrir a múltiples ventanas o regiones como otros enfoques.

El funcionamiento de YOLOv5 se basa en dividir la imagen de entrada en una cuadrícula de celdas, cada una de las cuales predice un número fijo de cuadros delimitadores (Bounding boxes) y sus respectivas probabilidades de contener un objeto. Cada cuadro delimitador tiene cuatro coordenadas (x, y, ancho y alto) y una puntuación de confianza que indica la certeza de que el cuadro contiene un objeto. Además, cada celda predice la probabilidad de que el objeto pertenezca a cada una de las clases predefinidas. Estas probabilidades se multiplican por la puntuación de confianza para obtener la puntuación final de cada clase para cada cuadro delimitador. Finalmente, se aplica un algoritmo de supresión de no máximos (Non-maximum suppression) para eliminar los cuadros delimitadores redundantes o superpuestos y quedarse con los más precisos. También será posible el evaluar la red con las métricas obtenidas por medio de Roboflow, las cuales

3.1 Roboflow

Con las 151 imágenes que se recopilaron se llenaron los bancos de imágenes para posteriormente clasificarlas y segmentarlas para determinar el área de las imágenes que se quiere que detecte la red, además de clasificarla y agruparlas en su respectivo grupo.

Figura 1. Ejemplos fotografías de banco de imágenes.

Con la herramienta de segmentación se trazaron los bordes de los objetos, para dividir la imagen en regiones y asignar clases a cada proceso. También podemos contar los objetos segmentados por imagen y usar colores distintos para diferenciarlos. Este proceso se hace manualmente con cada imagen del banco.

Figura 2. Segmentación general de hortalizas.

Al grupo de validación usualmente se le asigna un número similar al de prueba, este grupo es asignado para realizar múltiples interacciones entre lo que se entrenó para ver el porcentaje de acierto y errores que existen en el modelo para seguir haciendo pruebas para ir incrementando el porcentaje de asertividad.

La red convolucional se valida con el grupo de prueba, realizando varias iteraciones (o Épocas) sobre las imágenes y comparando la efectividad con modelos previos que no usaron validación. Así se verifico que el entrenamiento de la red haya sido adecuado y se evita el sobreajuste. Asi que se dividieron los datos para el entrenamiento, validación y prueba.

Figura 5. Grupos de entrenamiento, validación y prueba.

La detección de objetos consiste en identificar y categorizar los objetos que aparecen en las imágenes. Para optimizar el desempeño de estos modelos de aprendizaje profundo, es necesario realizar un preprocesamiento de los datos, que se nos ofrece como una tercera opción para el entrenamiento. En esta opción, podemos recortar, cambiar el tamaño, rotar, convertir a escala de grises y aplicar otras transformaciones a las imágenes antes del entrenamiento. Esto nos ayuda a mejorar la calidad del conjunto de datos y a obtener un modelo de aprendizaje más preciso y mejor ajustado.

Para mejorar el rendimiento de los modelos se aplico el aumento de datos (Data Augmentation) y preprocesamiento para alterar o agregar elementos duplicados a la imagen e incrementar el conjunto de entrenamiento y evitar el sobreajuste, lo que se reflejo en una mayor precisión y generalización de los modelos.

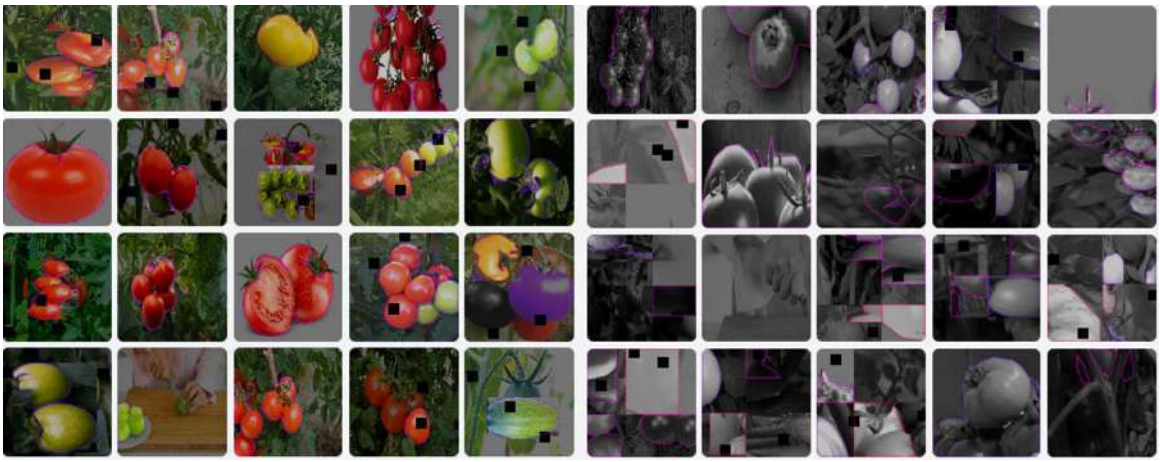


Figura 6. Aumento de datos y preprocesamiento.

3.2 YOLOv5 en Google Colab

El funcionamiento de YOLOv5 se basa en dividir la imagen de entrada en una cuadrícula de celdas, cada una de las cuales predice un número fijo de cuadros delimitadores (Bounding boxes) y sus respectivas probabilidades de contener un objeto. Cada cuadro delimitador tiene cuatro coordenadas (x, y, ancho y alto) y una puntuación de confianza que indica la certeza de que el cuadro contiene un objeto. Además, cada celda predice la probabilidad de que el objeto pertenezca a cada una de las clases predefinidas. Estas probabilidades se multiplican por la puntuación de confianza para obtener la puntuación final de cada clase para cada cuadro delimitador. Finalmente, se aplica un algoritmo de supresión de no máximos (Non-maximum suppression) para eliminar los cuadros delimitadores redundantes o superpuestos y quedarse con los más precisos.

Después de generar la versión de prueba en Roboflow, una vez culminada este entrenamiento nos da la opción de exportar el conjunto de datos, dentro de esta opción da distintos tipos de formato para su uso, en este caso se utilizó en PyTorch por lo cual nos genera una API que podremos utilizar en el YOLOv5 que utilizamos en Google Colab.

En Google Colab se corre la primera sección del código para instalar los requerimientos que se encuentran en el repositorio de Github, después de esto se utilizara la API generada en Roboflow para añadir el conjunto de datos y acceder directamente a esta red entrenada, además de su banco de imágenes, junto con la segmentación para la ejecución y prueba de esta misma en el entorno de YOLOv5.

```
[1] !git clone https://github.com/ultralytics/yolov5
    %cd yolov5
    %pip install -qr requirements.txt
    %pip install -q roboflow

    import torch
    import os
    from IPython.display import Image, clear_output
    print(f"Setup complete. Using torch {torch.__version__} ({torch.cuda.get_device_properties(0).name if torch.cuda.is_available() else 'CPU'})")

    Cloning into 'yolov5'...
    remote: Enumerating objects: 15943, done.
    remote: Counting objects: 100% (63/63), done.
    remote: Compressing objects: 100% (51/51), done.
    remote: Total 15943 (delta 28), reused 34 (delta 12), pack-reused 15880
    Receiving objects: 100% (15943/15943), 14.67 MiB | 26.31 MiB/s, done.
    Resolving deltas: 100% (10923/10923), done.
    /content/yolov5
    ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 188.6/188.6 kB 3.2 MB/s eta 0:00:00
    ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 614.3/614.3 kB 33.4 MB/s eta 0:00:00
    ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 62.7/62.7 kB 6.1 MB/s eta 0:00:00
    ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 58.5/58.5 kB 1.9 MB/s eta 0:00:00
    ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 155.3/155.3 kB 7.5 MB/s eta 0:00:00
    ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 178.7/178.7 kB 21.5 MB/s eta 0:00:00
    ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 58.8/58.8 kB 7.8 MB/s eta 0:00:00
    ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 49.1/49.1 MB 19.6 MB/s eta 0:00:00
    ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 67.8/67.8 kB 8.5 MB/s eta 0:00:00
    ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 63.3/63.3 kB 8.1 MB/s eta 0:00:00
    ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 54.5/54.5 kB 7.0 MB/s eta 0:00:00
    Setup complete. Using torch 2.0.1+cu118 (Tesla T4)
```

Figura 10. Instalación de requerimientos.

Luego es necesario configurar el conjunto de datos, por lo que en esta sección se uso de nuestra clave API gratis para proyectos personales generada por Roboflow. Con la cual hará referencia a nuestra cuenta, verificar el acceso al servicio y cual será la versión que utilizaremos para la prueba.

```
[ ] !pip install roboflow

    from roboflow import Roboflow
    rf = Roboflow(api_key="sCS21wmXMZouQAcOOVe")
    project = rf.workspace("universidad-autonoma-de-zacatecas").project("tesisirm")
    dataset = project.version(2).download("yolov5")

    Looking in indexes: https://pypi.org/simple, https://us-python.pkg.dev/colab-wheels/public/simple/
    Requirement already satisfied: roboflow in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (1.0.8)
    Requirement already satisfied: cycler==0.10.0 in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (0.10.0)
    Requirement already satisfied: pyparsing==2.4.7 in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (2.4.7)
    Requirement already satisfied: chardet==4.0.0 in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (4.0.0)
    Requirement already satisfied: opencv-python>=4.1.2 in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (4.7.0.72)
    Requirement already satisfied: kiwisolver>=1.3.1 in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (1.4.4)
    Requirement already satisfied: numpy>=1.18.5 in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (1.22.4)
    Requirement already satisfied: Pillow>=7.1.2 in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (8.4.0)
    Requirement already satisfied: requests-toolbelt in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (1.0.0)
    Requirement already satisfied: urllib3>=1.26.6 in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (1.26.15)
    Requirement already satisfied: tqdm>=4.41.0 in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (4.65.0)
    Requirement already satisfied: PyYAML>=5.3.1 in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (6.0)
    Requirement already satisfied: python-dateutil in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (2.8.2)
    Requirement already satisfied: wget in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (3.2)
    Requirement already satisfied: certifi==2022.12.7 in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (2022.12.7)
    Requirement already satisfied: requests in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (2.27.1)
    Requirement already satisfied: matplotlib in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (3.7.1)
    Requirement already satisfied: python-dotenv in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (1.0.0)
    Requirement already satisfied: six in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (1.16.0)
    Requirement already satisfied: idna==2.10 in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from roboflow) (2.10)
    Requirement already satisfied: packaging>=20.0 in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from matplotlib->roboflow) (23.1)
    Requirement already satisfied: contourpy>=1.0.1 in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from matplotlib->roboflow) (1.0.7)
    Requirement already satisfied: fonttools>=4.22.0 in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from matplotlib->roboflow) (4.39.3)
    Requirement already satisfied: charset-normalizer==2.0.8 in /usr/local/lib/python3.10/dist-packages (from requests->roboflow) (2.0.12)
    loading Roboflow workspace...
    loading Roboflow project...
    Downloading Dataset Version Zip in /content/datasets/TesisIRM-2 to yolov5pytorch: 100% [8158855 / 8158855] bytes
    Extracting Dataset Version Zip to /content/datasets/TesisIRM-2 in yolov5pytorch:: 100%[━━━━━━━━━━] 314/314 [00:00<00:00, 1998.25it/s]
```

Figura 11. Carga de la red convolucional en Google Colab.

Una vez se accede de manera exitosa, se entrena el modelo YOLOv5 de acuerdo a la red que entrenamos previamente en la plataforma de Roboflow con nuestro procesado y anotaciones en el apartado de segmentación, además de determinar el tamaño del lote y las imágenes de entrada. Para posteriormente evaluar nuestra propia red en la detección de hortalizas mediante visión artificial y observar de manera visual el nivel de reconocimiento que se tiene en imágenes asignadas fuera del banco de imágenes para observar su ejecución en entornos nuevos.

3. Resultados

Se realizaron múltiples iteraciones de entrenamiento de la red neuronal para evitar el sobreajuste, que se produce cuando el modelo tiene un excelente rendimiento en los datos de entrenamiento. Se crearon tres variantes de la misma arquitectura de red neuronal, denominadas V1, V2 y V3, con configuraciones de datos diferentes, y se entrenaron y evaluaron utilizando subconjuntos distintos de un conjunto de imágenes original.

Para evaluar la capacidad de la red neuronal en la detección de objetos, se empleó la herramienta Roboflow, que proporciona métricas como mAP (Mean Average Precision), precisión y recall. Estas

métricas ofrecen información sobre la calidad de las predicciones y permiten comprender el rendimiento específico de la red convolucional.

Tabla 2. Resultados de entrenamiento y prueba.

Red	mAP	Precisión	Recall
V1	55.3%	59.2%	63.6%
V2	84.5%	79.2%	78.7%
V3	85.8%	74.2%	83%

El mAP se utiliza para evaluar el rendimiento del sistema de detección de objetos, representando la precisión promedio en todas las clases de objetos detectables. La precisión se calcula como la proporción de objetos correctamente detectados en relación con el total de objetos detectados, con un rango de valores entre 0 (peor rendimiento) y 1 (rendimiento óptimo). La precisión es una medida fundamental para evaluar la capacidad de la red en la detección de objetos, indicando la proporción de objetos detectados correctamente en relación con el total de objetos presentes en la imagen. Una mayor precisión implica una localización precisa de los objetos de interés y menos falsos positivos, dependiendo del umbral de superposición utilizado. El recall mide la capacidad de la red para detectar todos los objetos reales en las imágenes sin dejar ninguno fuera y sin confundirlos con objetos similares en tamaño, color u otros atributos.

Estos parámetros son esenciales para comprender, evaluar y optimizar el modelo, evitando tanto el sobreajuste como el subajuste mediante técnicas como la validación cruzada o la búsqueda en rejilla. Su uso permite obtener resultados más precisos y confiables en la detección de objetos.

Comparando los resultados de las redes se puede observar el como la red V1 comprende de manera correcta los objetos que esta está buscando y el cómo las otras versiones alternativas tienen un sobreajuste lo cual comienza a disminuir la capacidad de detectar de manera correcta, lo cual indica que la red tiene una capacidad limitada para detectar todos los objetos que se le presentan. Esto puede deberse a varios factores, como la calidad de las imágenes, el tamaño y la variedad de los objetos, o la arquitectura de la red.

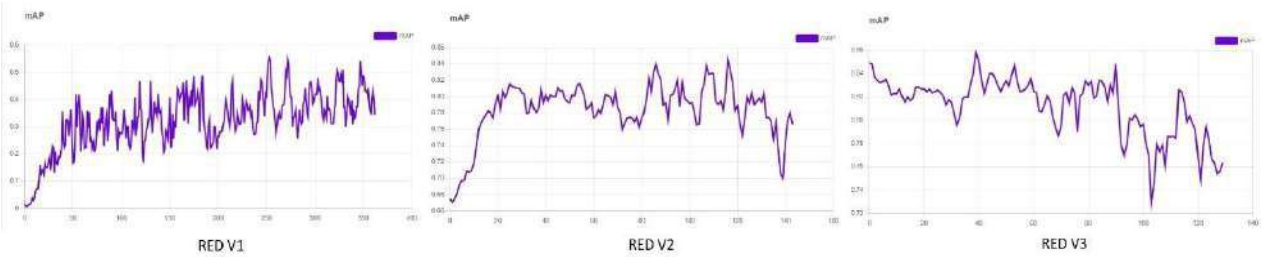
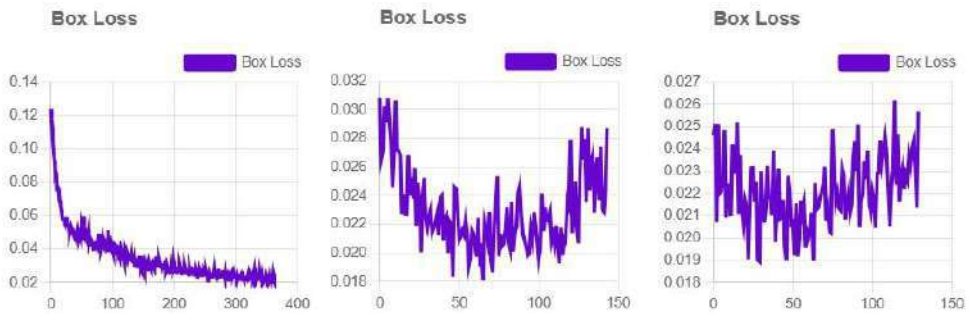


Figura 12. Comparativa de mapas mAP.

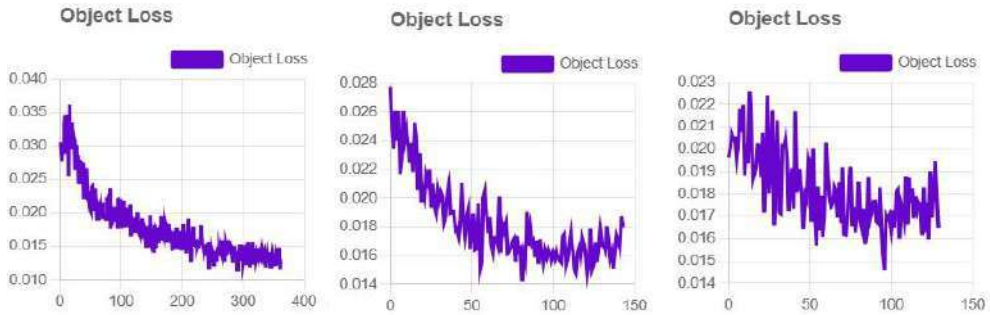
En la asignación de cuadros delimitadores las redes presentaron un comportamiento correcto, ya que en todos los casos mantuvieron una mejora en el entendimiento y delimitación de los objetos, sin embargo, en los casos de las redes V2 y V3 tuvieron una disminución de esta capacidad al final de las prueba, pero sin llegar a ser valores significativos que perjudicaran la red de forma notoria.



RED V1 RED V2 RED V3

Figura 13. Comparativa de Box Loss.

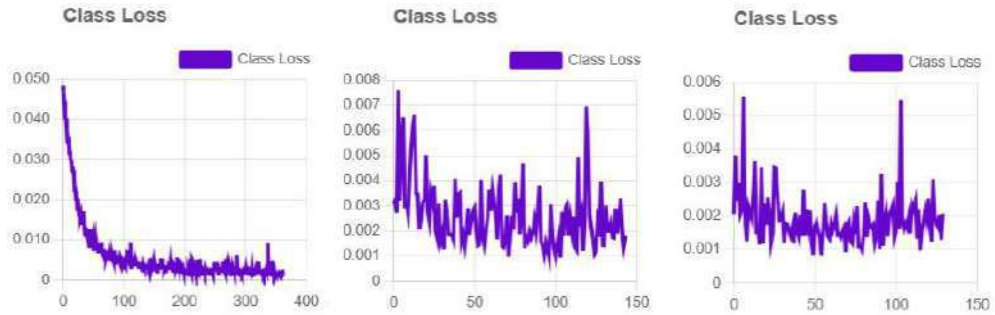
En la perdida de objetos las redes tuvieron resultados positivos, ya que todas las redes disminuyeron en gran cantidad los valores erróneos en la detección, por lo que todas las redes mejoraron en este aspecto. Llegando al punto de tener en todos lo casos menos del 20% de perdidas de objetos, estos objetos no detectados en su mayoría son por vegetación presente en las imágenes, desenfoques y baja calidad en la zona de la hortaliza lo cual genera que la red no sea capaz de confirmar que el objeto sea lo que se está intentando detectar.



RED V1 RED V2 RED V3

Figura 14. Comparativa de Object Loss.

En la asignación de etiquetas las redes fueron capaces de detectar de manera correcta en la mayoría de ocasiones, los porcentajes de error fueron bajos debido a que la red es capaz de detectar y clasificar si los objetos presentes contaban con las cualidades físicas para ser no maduro, maduro o en mal estado.



RED V1 RED V2 RED V3

Figura 15. Comparativa de Class Loss.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 14, pp. 164 – 175
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

4. Evidencias

Durante la etapa de prueba se aplicaron los diferentes modelos a nuevos datos que no habían sido utilizados ni en el entrenamiento ni en la validación, con el fin de verificar las condiciones que se habían mostrado de forma gráfica al entrenar las redes. Esta fase permitió evaluar el rendimiento de los modelos y su habilidad para generalizar ante distintos escenarios, comparando los resultados obtenidos con los valores reales.

Se realizó un experimento con la red V1, la cual mostraba un comportamiento irregular y una dificultad para identificar los objetos y colocar los cuadros delimitadores en el gráfico, pero que tenía buenos resultados en la práctica, ya que los cuadros delimitadores se ajustaban de forma adecuada en la mayoría de los casos.

Figura 16. Pruebas de V1.

Los resultados gráficos muestran que la red V2 superó a la red V1 en el análisis de imágenes, ya que tuvo una mayor precisión y recall para detectar y clasificar los objetos en las imágenes con los cuadros delimitadores apropiados. La red V1, por el contrario, presentó un menor rendimiento y más errores de localización y etiquetado. Estos hallazgos indican que la red V2 es más adecuada para la detección de objetos que la red V1.

Figura 17. Pruebas de V2.

Por último, en la versión V3 fue la que mostró mejores resultados al ser más precisa al detectar la hortaliza, aunque gráficamente esta red fue inferior a la V2 en la sección de precisión esta incrementó el porcentaje de recall, lo cual nos da una mejor fiabilidad al momento de que detecte algún objeto. Los cuadros delimitadores se adaptaban bien al objeto y las etiquetas correspondían a las clases con las que se entrenó la red. Adem´as de que se observó un etiquetado de manera correcta y un alto ´índice de asertividad.

Figura 18. Pruebas de V3.

5. Conclusiones

El propósito de este estudio fue diseñar y comparar las redes para determinar la arquitectura óptima de una red neuronal convolucional para llevar a cabo tareas de reconocimiento y desarrollar un modelo capaz de detectar y clasificar el grado de madurez de los tomates en campos agrícolas, utilizando imágenes capturadas por drones o cámaras. Para lograr esto, empleamos un conjunto de datos que contenía imágenes de tomates que habían sido segmentadas y categorizadas en tres clases: maduro, no maduro y en mal estado. La red neuronal fue entrenada utilizando diferentes conjuntos de imágenes para su fase de entrenamiento, validación y prueba, con el fin de evaluar su desempeño y prevenir el sobreajuste.

Una vez que la red neuronal fue entrenada, se evaluó su rendimiento utilizando diversas métricas. Obtuvimos un resultado del 74.2% en precisión al identificar los objetos y asignarles las etiquetas correspondientes, junto con la delimitación de sus bordes, y un 83% en recall, que mide la fiabilidad del sistema al confirmar que los objetos identificados eran realmente tomates y no otros objetos con propiedades físicas similares. Estos resultados indican que la red neuronal convolucional propuesta se presenta como una herramienta útil en el análisis de imágenes en el ámbito agrícola, con el potencial de mejorar tanto la productividad como la calidad de los cultivos.

Referencias

[1] López-Correa, J. M., Moreno, H., Ribeiro, A., & Andújar, D. (2022). Intelligent Weed Management Based on Object Detection Neural Networks in Tomato Crops. *Agronomy 2022, Vol. 12, Page 2953*, *12*(12), 2953. https://doi.org/10.3390/AGRONOMY12122953

[2] Pun, T. B., Neupane, A., & Koech, R. (2021). Quantification of Root-Knot Nematode Infestation in Tomato Using Digital Image Analysis. *Agronomy 2021, Vol. 11, Page 2372*, *11*(12), 2372. https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11122372

[3] Egi, Y., Hajyzadeh, M., & Eyceyurt, E. (2022). Drone-Computer Communication Based Tomato Generative Organ Counting Model Using YOLO V5 and Deep-Sort. *Agriculture (Switzerland)*, *12*(9), 1290. https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE12091290/S1

[4] Domingues, T., Brandão, T., Ribeiro, R., & Ferreira, J. C. (2022). Insect Detection in Sticky Trap Images of Tomato Crops Using Machine Learning. *Agriculture 2022, Vol. 12, Page 1967*, *12*(11), 1967. https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE12111967

[5] Aladhadh, S., Habib, S., Islam, M., Aloraini, M., Aladhadh, M., & Al-Rawashdeh, H. S. (2022). An Efficient Pest Detection Framework with a Medium-Scale Benchmark to Increase the Agricultural Productivity. *Sensors 2022, Vol. 22, Page 9749*, *22*(24), 9749. https://doi.org/10.3390/S22249749

[6] Wang, J., Yu, L., Yang, J., & Dong, H. (2021). DBA_SSD: A Novel End-to-End Object Detection Algorithm Applied to Plant Disease Detection. *Information 2021, Vol. 12, Page 474*, *12*(11), 474. https://doi.org/10.3390/INFO12110474

[7] Jeong, S., Jeong, S., & Bong, J. (2022). Detection of Tomato Leaf Miner Using Deep Neural Network. *Sensors 2022, Vol. 22, Page 9959*, *22*(24), 9959. https://doi.org/10.3390/S22249959

[8] Darwin, B., Dharmaraj, P., Prince, S., Popescu, D. E., & Hemanth, D. J. (2021). Recognition of Bloom/Yield in Crop Images Using Deep Learning Models for Smart Agriculture: A Review. *Agronomy 2021, Vol. 11, Page 646*, *11*(4), 646. https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11040646

[9] Wang, Y. ;, Chen, Y. ;, Wang, D., Wang, Y., Chen, Y., & Wang, D. (2022). Convolution Network Enlightened Transformer for Regional Crop Disease Classification. *Electronics 2022, Vol. 11, Page 3174*, *11*(19), 3174. https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS11193174

[10] Azfar, S., Nadeem, A., Ahsan, K., Mehmood, A., Siddiqui, M. S., Saeed, M., & Ashraf, M. (2023). An IoT-Based System for Efficient Detection of Cotton Pest. *Applied Sciences 2023, Vol. 13, Page 2921*, *13*(5), 2921. https://doi.org/10.3390/APP13052921

[11] Barraza, J. A., Espinoza, E. J., Espinos, A. G., & Serracin, J. (2019). Agricultura de precisión con drones para control de enfermedades en la planta de arroz. *Revista de Iniciación Científica*, *5*, 41–47. https://doi.org/10.33412/REV-RIC.V5.0.2368

[12] Gardiner, L.-J., Krishna, R., Phan, Q.-H., Nguyen, V.-T., Lien, C.-H., Duong, T.-P., Ti-Kuang Hou, M., & Le, N.-B. (2023). Classification of Tomato Fruit Using Yolov5 and Convolutional Neural Network Models. *Plants 2023, Vol. 12, Page 790*, *12*(4), 790. https://doi.org/10.3390/PLANTS12040790

[13] Magalhães, S. A., Castro, L., Moreira, G., dos Santos, F. N., Cunha, M., Dias, J., & Moreira, A. P. (2021). Evaluating the Single-Shot MultiBox Detector and YOLO Deep Learning Models for the Detection of Tomatoes in a Greenhouse. *Sensors 2021, Vol. 21, Page 3569*, *21*(10), 3569. https://doi.org/10.3390/S21103569

[14] Tsai, F.-T., Nguyen, V.-T., Duong, T.-P., Phan, Q.-H., & Lien, C.-H. (2023). Tomato Fruit Detection Using Modified Yolov5m Model with Convolutional Neural Networks. *Plants 2023, Vol. 12, Page 3067*, *12*(17), 3067. https://doi.org/10.3390/PLANTS12173067

[15] Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering*, *164*, 31–48. https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2017.09.007

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 15, pp. 176 – 184
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Diseño de un sistema de electromiografía para la evaluación de la salud de los músculos relacionados con la rodilla

Domínguez Sánchez Sergio[1], Mirelez Delgado Flabio Darío[1], Hernández González Umanel Azazael[1], Sánchez Rosales Christian Gamaliel[1], Velasco Ramírez Néstor[1], Domínguez Sánchez Sergio[1] y Flores Duarte Ana Jazive[1]

[1] Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Zacatecas., Zacatecas, México.
fmirelezd@ipn.mx

Resumen

El presente documento expone el diseño de un sistema de electromiografía para el prediagnóstico y análisis del estado de los músculos relacionados al movimiento de la rodilla. Por medio de los sensores EMG-826 y flex resistivo se obtendrán las señales eléctricas emitidas por la actividad muscular y el movimiento de la rodilla, respectivamente, para luego ser procesadas y graficadas en un interfaz humano máquina (HMI). El sistema contempla el diseño ergonómico de la carcasa que contendrá los componentes electrónicos, así como el de una rodillera para la sujeción del sensor flex.

Palabras clave: Electromiografía, EMG-826, Lesión de rodilla, diseño mecatrónico.

1. Introducción

La electromiografía (EMG) es el estudio de las señales eléctricas producidas por las contracciones musculares. El electromiograma representa la suma temporal y espacial de los potenciales de acción de las unidades motoras (PAUMs) durante su contracción y se puede crear mediante la señal electromiográfica. Esto permite una cuantificación más precisa y objetiva del comportamiento muscular [1].

Esta técnica es ampliamente usada para el diagnóstico de enfermedades causadas por la pérdida de la fuerza, debilidad o perdida de la masa muscular. Sirve para localizar el área de lesión o bien, ubicar la causa. Algunas enfermedades relacionadas a este padecimiento son: Esclerosis lateral amiotrófica, Miastenia gravis, Miopatías, Polineuropatía diabética, Polineuropatías, Radiculopatías Neuropatías, Síndrome del túnel del carpo.

Las lesiones en las rodillas son de las más comunes en los atletas jóvenes [2], [3], en algunos casos basta con aplicar tratamientos de rehabilitación, pero en situaciones en las que la lesión es más grave, se debe realizar una intervención quirúrgica. Después de una intervención quirúrgica traumática en la rodilla, es esencial comenzar con un plan de rehabilitación que asegure su éxito mediante el uso de ejercicios musculares controlados.

En este trabajo, se propone el diseño de un sistema capaz de detectar las señales musculares relacionadas con el movimiento de la rodilla para su posterior análisis y representación gráfica en una HMI. Mediante el uso de electrodos de superficie en el área donde se encuentran los músculos involucrados en la rodilla, se puede obtener de manera eficiente la información sobre la actividad muscular de forma no invasiva. Los datos recopilados por el sistema podrán ser utilizados para generar un prediagnóstico o pueden ser´ empleados directamente por un especialista para el diagnóstico o tratamiento de enfermedades de rodilla.

2. Metodología

Se propondrá un sistema que permita obtener las señales eléctricas producidas por el movimiento de los músculos de la rodilla. El sistema contara con un sensor EMG que detecte las señales de los músculos principales involucrados en el movimiento de la rodilla. Se construirá una rodillera flexible y de facil ajuste para el usuario, que además permita la integración de sensores flex para la obtención de la posición de la rodilla, según el ángulo de flexión de la misma. Se utilizará un microcontrolador para el uso y análisis de las señales generadas por el sensor EMG. Asimismo, se integrará una pantalla como HMI con la que se puedan graficar los datos obtenidos y permita la interpretación de las señales por un especialista, sirviendo como un punto de partida para tomar la mejor vía para un proceso de recuperación muscular para´ el usuario que utiliza el sistema, además de poder utilizarlo de forma facil y accesible, aprovechando las ventajas del dispositivo con la recolección de datos. Se diseñará una carcasa que contemple puertos externos para las conexiones de los electrodos del sensor EMG y el sensor resistivo flex, además de contener la electrónica necesaria para el correcto funcionamiento del sistema. El circuito será energizado por medio de baterías, logrando de esta manera la portabilidad.

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 1.

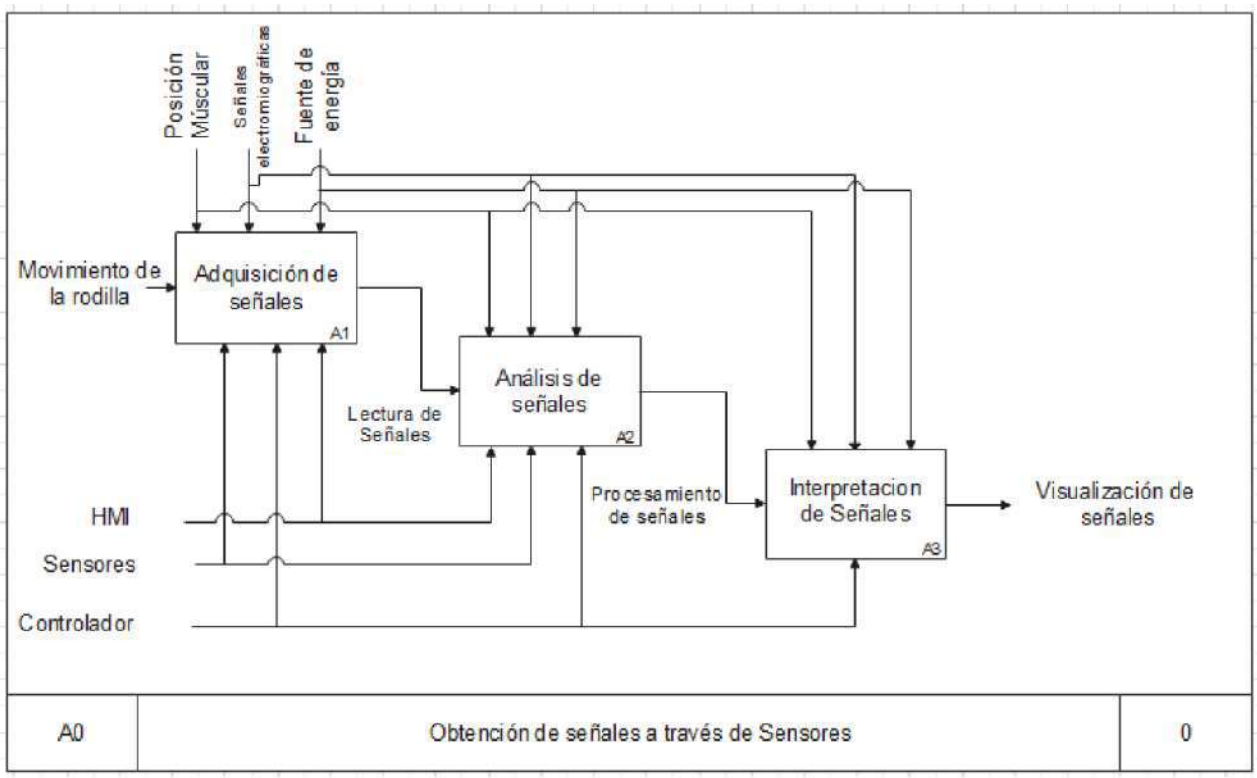


Figura 1. Diagrama IDEF-0 A0.

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:

- Obtener las señales musculares por medio de un sensor EMG.
- Obtener el ángulo de flexión o posición de la rodilla.

- HMI intuitiva.
- Debe ser portátil y autónomo.
- Rodillera flexible que permita la integración de los sensores.
- Representación de los datos por medio de pantalla.
- Carcasa con dimensiones mínimas resistente a caídas.

Tomando en cuenta las necesidades listadas anteriormente, se generaron los diseños conceptuales que se muestran en la figura 2. Se elegirá el que cumpla de manera más eficiente con las necesidades de diseño. A continuación, se lista cada diseño conceptual con sus respectivas características:

Figura 2: Diseños conceptuales para el sistema electromiográfico.

1) Diseño conceptual 1: Para generar el diseño conceptual mostrado en la figura 2a se tomó en cuenta lo siguiente:

- Se propuso un HMI que contenga una pantalla LCD que manipulara los datos obtenidos de los sensores por medio de tres botones colocados al frente.
- Se consideró colocar los puertos en la carcasa hacia los electrodos del sensor EMG así como para el flex permitiendo el monitoreo de las señales eléctricas.
- La rodillera contiene una esponja/goma en la parte de la rodilla haciéndola cerrada y en uno de sus laterales tendrá el sensor flex.

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

- Se plantea trabajar una carcasa que contenga una pantalla LCD que manipulará los datos obtenidos de los sensores por medio de tres botones colocados al frente, este tipo de carcasa será de similar a una computadora personal.
- Se tomó en cuenta la conexión de la carcasa hacia los sensores externos para el monitoreo de las señales eléctricas.
- Se valoro colocar tiras de velcro en la parte de arriba y abajo de la rodillera para su correcta sujeción, generando de esta forma una rodillera abierta casi en su totalidad en la parte frontal. En los laterales se tendrá el sensor flex.

3) Diseño conceptual 3: Para la formulación del diseño conceptual de la figura 2c se consideró lo siguiente:

- Se formuló una carcasa que pueda contener una pantalla táctil, para que el tamaño de la HIM sea de dimensiones aproximadas a esta y a consecuencia sea portable.
- Se contemplaron los puertos de conexión para los sensores en la parte lateral de la carcasa.
- La rodillera contendrá tiras del velcro arriba y abajo para su correcta sujeción, así como a los laterales integrará el sensor flex. En esta variante se consideró una combinación de las dos versiones anteriores produciendo una rodillera abierta solo en la parte central, dejando libre la rótula de la rodilla.

Después de hacer un análisis comparativo de los tres diseños conceptuales propuestos, se determinó que el diseño conceptual 3 es el más adecuado con las siguientes ventajas:

- La pantalla permite realizar una representación gráfica adecuada de las señales eléctricas generadas por los músculos, además, permite diseñar una interfaz de control intuitiva por la propiedad de ser táctil, eliminando la implementación de botones de navegación.
- La rodillera permite la integración de un sensor flex para la detección de flexión, además de permitir la colocación del electrodo de referencia a hueso necesario para la correcta detección de las señales musculares.

3. Resultados

Una vez seleccionado el diseño conceptual 3 se procede a la elección de componentes electrónicos que cumplan de manera conveniente con las propiedades de funcionamiento del prototipo.

1) Pantalla: La pantalla seleccionada fue la Nextion NX4827T043 011R (figura 3) con 120X74X6.2 mm de dimensiones, 480X272 pixeles de resolución con función touch y peso de 93.8 g siendo lo suficientemente ligera para mantener la portabilidad del sistema. Como añadido, el fabricante de este dispositivo pone a disposición un editor de uso gratuito con el cual se puede crear y diseñar la interfaz de la propia pantalla.

Figura 3: Pantalla Nextion NX4827T043 011R.

2) Sensor EMG: El sensor EMG-826 es un sensor especializado dedicado a la medición de señales musculares que como característica principal es que fue diseñado para utilizarse en conjunto con numerosos microcontroladores (atmega 328, msp430, pic l6f86) ya que no entrega una señal EMG sin procesar (RAW), sino una señal amplificada, rectificada y suavizada que funciona correctamente con el convertidor analógico-digital (DAC) del microcontrolador. En la figura 4 se puede observar un ejemplo de conexión del sensor en conjunto con Arduino y sus electrodos. Para la correcta lectura de la señal muscular, los electrodos deben posicionarse siguiendo el código de colores de la siguiente manera: Electrodo de color rojo en el centro del músculo, electrodo de color azul al final del músculo, el electrodo color negro deberá posicionarse en alguna zona de hueso por ejemplo la rótula de la rodilla.

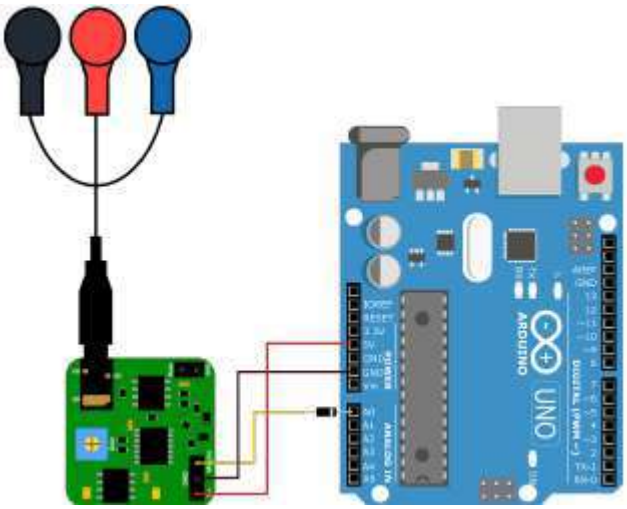


Figura 4: Diagrama de conexión del sensor EMG-826.

3) Sensor resistivo Flex.: Los sensores flex, figura 5, son resistencias analógicas que trabajan como divisores de voltaje variables. Es uno de los sensores más utilizados para la detección de flexión detectando desde 0◦, actuando como una resistencia de aproximadamente 25KΩ, hasta un ángulo de 90◦, comportándose como una resistencia de aproximadamente 100KΩ. Existen en el mercado sensores que cubren hasta 180° que se pueden considerar en caso de ser necesario. Según el "Protocolo de valoración de la patología de la rodilla" [4], la mayoría de las maniobras exploratorias para la valoración del estado muscular, se realizan con movimientos desde 0◦ hasta 90◦. De esta manera se cubre un rango exploratorio amplio del movimiento de la rodilla.

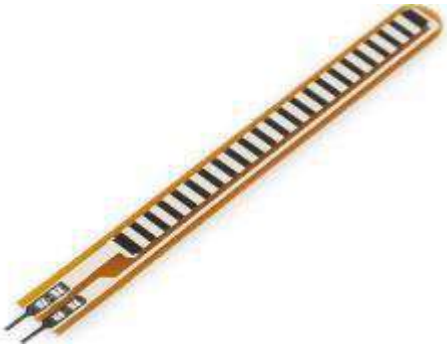


Figura 5. Sensor resistivo Flex.

4) Microcontrolador: Para controlar el sistema se optó por un microcontrolador Atmega328P. A diferencia de otras tarjetas de desarrollo genéricas como Arduino, el uso de un microcontrolador exclusivo permite el planteamiento de un diseño de tarjeta electrónica dedicada exclusivamente a la implementación de este sistema, procurando únicamente la utilización de los periféricos y recursos indispensables, y de esta manera abonar a la portabilidad del sistema, generando una reducción considerable en la utilización del espacio en la carcasa.

5) Fuente de energía: Se usará una batería Lipo 18650 de 7.4 V para alimentar los componentes que necesiten energía sin exceder el voltaje requerido por cada uno, esto con la finalidad de optimizar tiempo y costos. Las ventajas que se tienen es que están conformadas por un conjunto de baterías recargables de iones de litio, además tiene una capacidad de hasta 4400 mAh, el número de horas de duración puede variar, pero se calcula que con la pila completamente cargada duraría aproximadamente 11.65 horas.

Se diseñó la carcasa en un ensamblaje de 3 piezas, figura 6, la tapa trasera se diseñó con una profundidad de 3cm para la integración de los componentes electrónicos, se añadió un orificio cuadrado de 1cm por lado que servirá para el conector de carga de la batería, además de otros dos orificios cuadrados de 5mm por lado para los electrodos del sensor EMG y del conector del sensor flex.

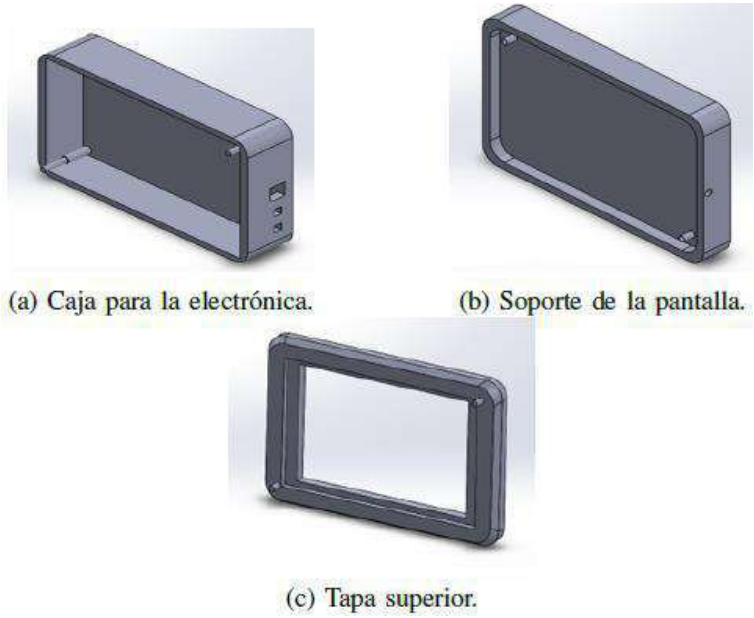


Figura 6: Piezas del ensamblaje de la carcasa para la HMI.

El ensamble completo de la carcasa se puede observar en la figura 7. En el inciso 7b se observa el diseño de los puertos mencionados anteriormente para la conexión de los electrodos, sensor flex y carga de batería.

Dado que se busca que el dispositivo sea portable, se implementaron estudios de caída a las piezas que conforman la carcasa para observar la deformidad generada en respuesta al impacto. El material utilizado de las librerías de materiales disponibles en SolidWorks© fue plástico ABS, material sumamente utilizado en proceso de fabricación aditivo debido a su alta resistencia [5]. El material ABS, es isotrópico elástico lineal, donde sus propiedades no varían con la dirección, logrando ser moldeable y de buen funcionamiento como elección de material para las piezas de la carcasa.

El primer análisis se realizó considerando el impacto en la parte inferior izquierda de la pieza 6c del ensamble. Se planteo una altura de 1.5 m como valor máximo para las simulaciones de caída, esfuerzo aplicado en los puntos donde hay más probabilidad de presentar golpes en situaciones de impacto. Se muestran los resultados en la gráfica de la figura 8 donde se observa una deformación unitaria equivalente, es decir, el cambio de dimensión por unidad de longitud o la deformación que ha sufrido la pieza al momento del impacto sobre el suelo rígido, de 0.01 en el punto crítico, considerándose prácticamente despreciable.

(a) Vista frontal.

(b) Vista lateral. 1 Entrada de electrodos, 2 Entrada del sensor Flex, 3 Entrada para carga de baterías.

Figura 7: Ensamble de la carcasa.

Se realizó un análisis estático a las partes que principalmente estarán sometidas a cargas las cuales son; cuerpo principal de la estructura del robot y el brazo trapezoidal encargado del sistema de locomoción. Para el análisis en esta parte se le aplicó una fuerza repartida de 343 N distribuida sobre la placa donde se encontrará el tanque de almacenamiento, el circuito eléctrico, la batería de alimentación y la bomba de agua. En la figura 6(a) se observa que el estudio arroja un factor de seguridad mínimo de 64.62, el cual indica que la estructura es capaz de soportar la carga a la que estará sometida. En la figura 6(b) se presentan los resultados de las deformaciones unitarias al momento de que se le aplique la fuerza distribuida de los componentes que se encontrarán en la estructura principal. Se observa que el cuerpo principal del robot tiene una deformación mínima por lo que es totalmente despreciable.

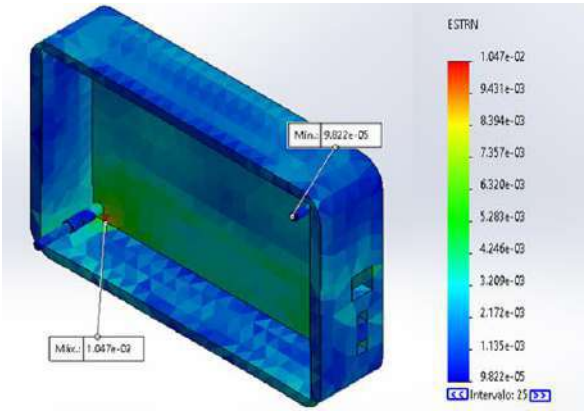


Figura 8: Análisis de caída en la parte inferior izquierda de la tapa trasera.

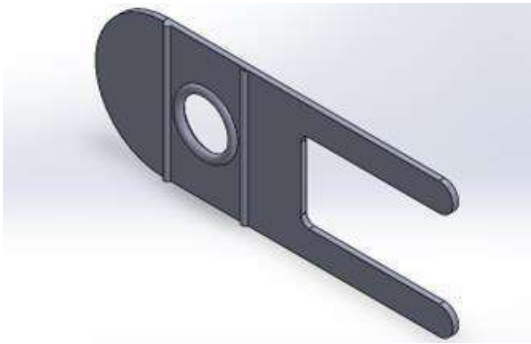
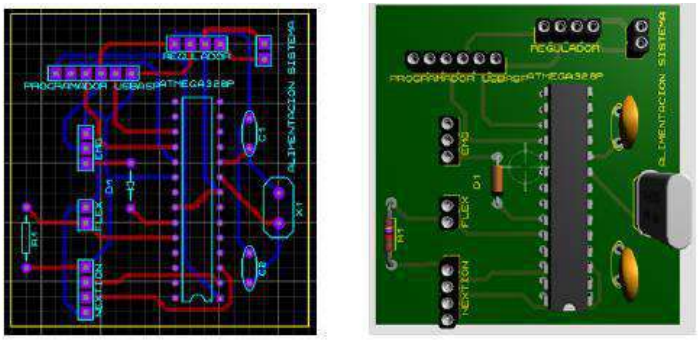


Figura 9: Vista frontal de la rodillera.

Una rodillera otorga protección solamente cuando existe movimiento en una posición erguida, como caminar o correr, así como arrodillarse [6]. Además, existen análisis de la influencia de rodilleras o protectores de rodillas en la cinemática de las extremidades inferiores durante la flexión profunda o casi completa de rodillas en superficies con diferentes pendientes, en los que se observó que las rodilleras no alteran la cinemática de las extremidades inferiores de forma que pueda reducir el riesgo de lesiones musculoesqueléticas, pero brindaban comodidad [7].

Para el diseño de la rodillera se valoró la opción de ser ajustable al usuario, además de la integración de elementos de detección. Como punto de partida se sopesó la integración de los electrodos en la rodillera como se ha realizado en prototipos para dar terapia de estimulación nerviosa [6]. Esta idea fue descartada ya que en este trabajo se utilizaron los electrodos para emitir pulsos eléctricos y no requerían de un acomodo específico de los mismos. En este caso, los electrodos deben posicionarse en puntos particulares de la extremidad que pueden variar de persona a persona y de la lesión respectiva del usuario, por lo que solo se contempló la integración del sensor flex en la rodillera. Para esto se añadió una tira en el lateral derecho de la rótula donde se insertará el sensor flex de manera que pueda obtener la inclinación al movimiento de la rodilla, se utilizará velcro en la punta de las dos extensiones del diseño para lograr un ajuste al momento, haciendo que se flexione de forma circular alrededor de la rodilla del usuario. La vista que se observa en la figura 9 es de la rodillera extendida, una vez que se desea acomodar a la rodilla se puede doblar, haciendo que las dos conexiones que sobresalen a la derecha puedan girar hasta llegar a la parte izquierda y ajustarse con el velcro que se utilizara para lograr el ajuste correspondiente.

Haciendo uso de editores de circuitos se diseñó la placa de circuito impreso (PCB). En ésta se encuentran las conexiones del sensor EMG, las del sensor flex, las de la batería, el regulador de voltaje que otorgará la tensión necesaria, los componentes electrónicos necesarios para el correcto funcionamiento del microcontrolador y el microcontrolador ATMEGA328P, tal como se muestra en la figura 10.



(a) Enrutado del circuito a doble cara.

(b) Visualización 3D del circuito.

Figura 10: Diseño de la placa de circuito impreso.

3. Conclusiones

En este proyecto se desarrolló un sistema compacto, con un diseñó eficaz que cumple con los requisitos planteados; El diseño de un sistema electromiográfico que sea capaz de obtener las señales eléctricas emitidas por los músculos, muestre las señales en una pantalla HMI y el uso de una rodillera ajustable con un sensor flex integrado para obtener la posición de la rodilla, sensor que es de utilidad que indicara la posición donde existe mayor presencia de dolor al ejercer una flexión.

Se optó por diseñar una carcasa rectangular con medidas óptimas, logrando que sea portable y cómoda, conformada por tres piezas principales que logran ensamblarse para contener todos los componentes y conectores necesarios para la obtención de las señales EMG de los músculos. Se

contempló material ABS para la construcción en proceso de fabricación aditiva que asegura una tolerancia a caídas de más de 1.5 metros.

De la misma manera, se diseñó una rodillera ajustable considerando el uso de velcro en las dos tiras que rodearán la rodilla del usuario, logrando el ajuste necesario con el objetivo de integrar el sensor flex en una de las ranuras ubicada al costado. Además, se trazó un círculo para la exposición de la rótula en la que se colocara el electrodo de referencia para la correcta obtención de las señales del músculo. Se consideraron aspectos importantes respecto al uso de la rodillera confiando en que el diseño propuesto no alterará las mediciones realizando el esfuerzo aplicado en las maniobras exploratorias.

Finalmente, las señales EMG obtenidas serán procesadas en un microcontrolador en conjunto con una interfaz gráfica por medio de la pantalla Nextion, donde se podrán mostrar las representaciones gráficas de las señales musculares por medio de un menú accesible y de fácil manejo.

Referencias

[1] E. Guzmán-Muñoz, G. Méndez-Rebolledo, E. Guzmán-Muñoz, and G. Méndez-Rebolledo, “Electromiografía en las Ciencias de la Rehabilitación,” Revista Salud Uninorte, vol. 34, no. 3, pp. 753–765, 2018

[2] L. V. Fortington, S. Bekker, and C. F. Finch, “Online news media reporting of football-related fatalities in Australia: A matter of life and death,” Journal of Science and Medicine in Sport, vol. 21, no. 3, pp. 245–249, 2018.

[3] D. M. Swenson, C. L. Collins, T. M. Best, D. C. Flanigan, S. K. Fields, and R. D. Comstock, “Epidemiology of knee injuries among U.S. high school athletes, 2005/2006-2010/2011,” Medicine and Science in Sports and Exercise, vol. 45, no. 3, pp. 462–469, 2013.

[4] J. Vergara Hernández, M. R. Díaz Peral, A. Ortega Cabezas, J. A. Blanco Leira, J. M. Hernández Cataño, A. Pereda Herrera, R. Muelas Velasco (consultor), and L. Molina Rodríguez (consultor), “Protocolo de valoración de la patología de la rodilla,” Medicina de Familia. SEMERGEN, vol. 30, no. 5, pp. 226–244, 2004.

[5] G. A. Ruiz Domínguez, R. U. Rivera Landaverde, G. Orrantia, M. D. J. Téllez Moroyoqui, and A´ . A. Valenzuela Martínez, “Estudio de Esfuerzo y Deformación de Piezas de Impresión 3D,” Conciencia Tecnológica, no. 57, pp. 28–33, 2019.

[6] P. Li, B. Corner, M. Hurley, C. Powell, and A. LaFleur, “Threedimensional (3D) Analysis of Knee Shape for Designing a Knee-pad,” Procedia Manufacturing, vol. 3, no. Ahfe, pp. 3689–3693, 2015.

[7] S. P. Breloff, E. W. Sinsel, A. Dutta, R. E. Carey, C. M. Warren, F. Dai, S. Ning, and J. Z. Wu, “Are knee savers and knee pads a viable intervention to reduce lower extremity musculoskeletal disorder risk in residential roofers?,” International Journal of Industrial Ergonomics, vol. 74, no. September, p. 102868, 2019.

.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 16, pp. 185 – 197
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Fabricación aditiva de filamento para guías quirúrgicas en implantología dental

López Vázquez Francisco Javier[1], Guerrero Osuna Hector Alonso[1], Luque Vega Luis Fernando[2,3], Carrasco Navarro Rocío[4], Solis Sanchez Luis Octavio[1] y Martínez Blanco Ma. del Rosario[1]

[1]Posgrado en Ingeniería y Tecnología Aplicada, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas 98000, Zacatecas, México
[2]Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales, ITESO, Tlaquepaque 45604, Jalisco, México
[3]Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Jerez, Jerez 99863, Zacatecas, México
[4]Laboratorio de Investigación en diseño óptimo, dispositivos y materiales avanzados – OPTIMA, Departamento de matemáticas y física, ITESO, Tlaquepaque 45604, Jalisco, México
36175324@uaz.edu.mx

Resumen

La aplicación del diseño asistido por computadora (CAD) y la fabricación asistida por computadora (CAM) en odontología ha progresado en las últimas décadas, llevando al desarrollo de la digitalización y automatización de diversos procesos de trabajo. Hasta hace poco, en odontología, el proceso CAM era sinónimo del proceso de fabricación sustractiva (impresión 3D en resina). En este trabajo se evalúa la fabricación de guías quirúrgicas para implantología dental mediante la técnica de Modelado por Deposición Fundida (FDM). En el proceso de fabricación se utilizó una guía de parámetros recomendados y probados en máquinas FDM de tipo cartesiano. Además, se analizaron los modelos realizados en impresora 3D de tipo FDM para comprobar su fiabilidad, resistencia y la desviación del modelo realizado y escaneado respecto al modelo base. Los modelos obtenidos mediante impresión 3D, se realizaron en una impresora Ender 3 de la marca Creality, considerada como un modelo de entrada, a la cual se le realizaron modificaciones en sus parámetros con el objetivo de lograr resoluciones similares al de una impresora de resina. Se obtuvo una resolución intermedia entre máquinas DLP de gama media con calidad de 0.05mm por capa y de gama alta con calidad de 0.035mm por capa, logrando así una calidad de 0.042mm por capa, lo que permite obtener una resolución mayor a los modelos comerciales del mercado y así mismo, más económico.

Palabras clave: Máquinas DLP y FDM, Modelado 3D, Impresión 3D, Odontología digital, CBCT.

1. Introducción

La impresión 3D ha permitido revolucionar junto a la industria 4.0 la manera en la cual se fabrican nuevos prototipos, modelos y productos, demostrando así que los métodos de fabricación aditiva (impresión 3D) permiten mejorar la competitividad debido a sus grandes capacidades de producción, generando un margen de utilidad del 13% respecto al tradicional [1]. Los métodos de fabricación aditiva han impactado de manera positiva en una amplia variedad de campos de la ciencia, mientras que su importancia en la medicina es cada vez mayor, permitiendo la fabricación de órganos o tejidos a base de biomateriales [2].

Actualmente, la amplia variedad de modificaciones que permiten los sistemas de impresión 3D de tipo FDM les ha permitido ser utilizadas en una extensa variedad de mercados, como en la fabricación de piezas de arte, prototipos de arquitectura, biomodelos para implantología, fabricación de casas,

comida, tejidos, órganos, etc. Esto debido a que gran parte de los sistemas de impresión 3D son de código abierto lo que permite importar sistemas externos para ser usados dentro de la estructura de una impresora 3D [3].

Dentro de la odontología, la tecnología de impresión 3D permite desarrollar y fabricar dientes impresos, bio-modelos y además guías quirúrgicas. En el caso de la fabricación de dientes, gracias al estudio presentado por Abraham Johnson [4] estos muestran una precisión de 0.5mm a comparación de los dientes reales, mientras que la fabricación de guías quirúrgicas realizadas en impresión 3D en resina mostraban una desviación de al menos 0.05mm [4,5]. Aunado a esto, los nuevos métodos suelen utilizar impresoras 3D de resina, debido a que su construcción permite obtener resoluciones de impresión de 2K hasta 4K. Este modelo de impresión 3D se le conoce como DLP (por sus siglas en inglés, Digital Light Processing) el cual es un proceso basado en la polimerización de resina mediante un rayo láser, esto creando capas horizontales apilándolas una sobre otra, mientras que el método de impresión 3D FDM (por sus siglas en inglés, Fused Deposition Modeling) repite el mismo proceso sin embargo cada capa está hecha a base de un polímero fundido [6].

La cirugía de implantes dentales se ha asociado con diversos problemas clínicos, la desviación de la posición original representa la más importante, debido a que una mala colocación del implante puede tener como consecuencia el uso de dispositivos posteriores como brackets [7]. Las tecnologías CAD/CAM se pueden definir como el uso de sistemas informáticos para la creación, modificación y así también la planificación, gestión y control de las operaciones de una planta de fabricación [8], estas permiten crear incrustaciones, pilares de implantes, coronas, etc. A pesar del costo de estas máquinas, la odontología se ha adaptado a estas tecnologías haciendo uso de escáneres digitales, diseño asistido por computadora, etc [9].

Se ha demostrado que el diseño digital de guías quirúrgicas representa grandes beneficios para los pacientes, debido a que estas se pueden personalizar y adaptar perfectamente a la anatomía de cada paciente; colocando alineadores metálicos modificando los ángulos de barrenación alineados al maxilar del paciente, reduciendo así el riesgo de complicaciones y desviaciones en el implante y así mismo, mejorar el resultado final del tratamiento [10]. Estos nuevos modelos se suelen fabricar mediante la impresión 3D, usando además herramientas de medición y escaneo para corroborar las dimensiones, además el uso selectivo de las impresoras DLP permite obtener mejores resoluciones de impresión y menor desviación [11].

La selección de procesos en los cuales se puede realizar una guía quirúrgica se relacionan a los diferentes parámetros de fabricación, resaltando como uso recomendado de impresoras de resina debido a que los parámetros suelen estar predefinidos por los propios fabricantes y así mismo la calidad de impresiones [12], mientras que los modelos de impresión en FDM permiten una mayor personalización, además de que cumplen con los requisitos de biocompatibilidad y así también la modificación de los parámetros [13]:

En la presente investigación se describe la optimización y estandarización de los parámetros de máquinas de impresión 3D que implementan FDM de tipo cartesiano para la fabricación de guías quirúrgicas de bajo costo utilizadas en implantología dental. Para validar los parámetros de optimización y estandarización se procede a la comparación entre una réplica manufacturada mediante el proceso FDM y una muestra, tanto digital como física, correspondiente a una guía quirúrgica proporcionada por la clínica dental “Fernandez&Nava”, el cual es un consultorio especializado con más de 6 años de experiencia en implantología dental y cuentan con una base de datos de poco más de 100 tomografías de haz cónico CBCT, (Cone Beam Computed Tomography por sus siglas en inglés), de las cuales se tomó un modelo para el desarrollo de esta exploración.

Las principales contribuciones de este trabajo son:

- Se proponen diferentes valores de optimización y estandarización de máquinas de impresión 3D FDM de tipo cartesiano para la fabricación de guías quirúrgicas de bajo costo.

- Se evalúan la fabricación de las guías quirúrgicas y biomodelos con diferentes parámetros de impresión.
- Clasificar/Estandarizar parámetros para impresoras 3D (FDM y SLA) para una correcta fabricación de guías quirúrgicas.

Este trabajo está estructurado de la siguiente forma: La sección 2 describe los fundamentos y estado del arte en los elementos relevantes en impresoras 3D orientados a la fabricación de biomodelos y guías quirúrgicas. En la sección 3 se describe la fabricación de los biomodelos y guías quirúrgicas aplicando las condiciones y parámetros más relevantes. Posteriormente se establecen los métodos de comparación entre el modelo de referencia y el fabricado, evaluando los resultados en la sección 4. Finalmente una discusión de los resultados se realiza en la sección 5.

2. Trabajos relacionados

La investigación presentada por J. Taczala et al [20], realizaron un análisis de comparación mediante el Software GOM Inspector. Para analizar la desviación de dos modelos impresos en 3D (MJP y FDM) respecto a un modelo realizado en termoplástico para obtener un biomodelo de yeso, presentando los resultados en la Tabla 1.

Tabla 1. Evaluación de desviación.

Modelo de Impresión	Desviación Eje X	Desviación Eje Y
MJP	0.04mm ± 0.02mm	0.06mm ± 0.02mm
FDM	0.06mm ± 0.04mm	0.07mm ± 0.04mm

Mientras que una investigación realizada por Valentín Hromadnik et al [21], realizaron una serie de prototipos en 4 modelos de impresión 3D, demostrando valores menores a 1mm en la desviación máxima, los cuales son aceptados dentro de los parámetros clínicos.

Se han realizado diversas investigaciones que destacan las ventajas del uso de guías quirúrgicas impresas en 3D, como el caso de Linares et al [22], quienes demostraron que el uso de guías impresas disminuye el tiempo del tratamiento, reduce la presión psicológica del paciente y además, el proceso de extracción a la colocación del implante conlleva menor tiempo, mientras que la técnica de mano alzada solo reduce costos en el presupuesto del implantologo, aumentando problemas consecuentes como la desviación en el eje X o Y. Para obtener óptimos resultados, es necesario conocer la descripción y ventajas de un uso adecuado de los parámetros de una impresora 3D FDM de tipo cartesiano.

● ***Orientación***

El estudio presentado por Ashtankar et al [14], muestra un total de cinco prototipos con orientaciones de 0, 30, 45, 60 y 90 grados, comprobando la resistencia mecánica, resistencia a la compresión, tracción, etc., dando como resultados que los modelos de 0 a 45 grados, logran mantener una mayor resistencia mecánica respecto a los modelos que se fabrican de 45 a 90 grados.

● ***Altura de capa***

Esta se refiere a la cantidad de material depositado a lo largo del eje vertical, en una sola capa. La altura de capa siempre será menor al diámetro de la boquilla [14]. Investigaciones realizadas por Anthony A. D´Amico et al, demuestran que una altura de capa más baja, logran aumentar hasta un 22% la resistencia a la tensión [15].

● ***Ángulo de capa***

Este ajuste se refiere al ángulo en el cual se va depositando el material con respecto al eje X; el estudio presentado por O. S. Es-Said et al [116], demostró en sus investigaciones que la orientación de la capa, después del grosor de las paredes puede permitir tener mayor elasticidad al imprimir a 0 grados.

Además, también cuenta con el mayor porcentaje de ruptura con respecto a imprimir a 45 grados, que tiene mayor resistencia, pero menor flexibilidad [16].

● ***Velocidad de impresión***

Esta se refiere a la velocidad en la que se desplaza la boquilla mientras deposita el polímero fundido a lo largo de cada capa. Además, el ángulo de deformación puede ajustarse controlando las velocidades de impresión con valores más altos, obteniendo mayor tensión residual almacenada [17].

● ***Densidad de relleno***

Jhon Solomon et al. [13] refieren la densidad de relleno como el volumen del material impreso. Esta configuración afecta directamente las propiedades mecánicas del modelo, es decir, que a menor densidad se presenta menor propiedad mecánica mientras que a mayor densidad existe mayor propiedad mecánica [14].

● ***Diámetro de la boquilla***

El valor del diámetro de la boquilla afecta principalmente el tiempo de fabricación de un modelo, por lo que es posible decir que entre mayor es el diámetro de la boquilla, menor será el tiempo necesario para la fabricación de un modelo; no obstante, entre mayor es el diámetro de la boquilla, tendrá un mayor error en la geometría del modelo y viceversa [14].

3. Materiales y métodos

La muestra digital proporcionada, se sometió a un análisis de fabricación, en tres máquinas de modelos diferentes; Ender 3, CR10 V3 y CR10-S5, de los cuales se consideraron sus características técnicas. Las impresoras 3D de tipo FDM se clasifican en 7 tipos impresora 3D Scara, impresora 3D Delta, impresora 3D H-Bot, impresora 3D Core-XY, impresora 3D de cinta transportadora, impresora 3D polar, impresora 3D de brazo robótico [23]. Así mismo, las impresoras de tipo cartesiano cuentan con dos sistemas de extrusión diferentes; sistema directo y de tipo bowden.

- **Sistema Bowden:** en este sistema, el motor del extrusor se coloca separado al cabezal donde se deposita el material, colocando un tubo PTFE (por sus siglas en inglés, politetrafluoroetileno) donde se transporta el material, esto permite aumentar las velocidades, sin embargo, es más difícil trabajar con materiales abrasivos [24].
- **Sistema Directo:** en este sistema, el motor del extrusor se coloca por encima del cabezal donde se deposita el material, lo que permite trabajar con materiales flexibles, ABS (por sus siglas en inglés, Acrilonitrilo Butadieno Estireno), Nylon, etc., evitando la aparición de atascos, hilos, etc. [24]

Las características técnicas más relevantes dentro de una impresora 3D que se utilizaron se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Características técnicas en máquinas FDM

Modelo	Desventajas	Ventajas
Ender 3	Un solo eje Z Sistema de extrusión bowden	Formato de impresión pequeño Buen calentamiento en la cama
CR10 V3	Formato de impresión mediano	Doble eje Z Sistema de extrusión directa Buen calentamiento en la cama
CR10-S5	Sistema de extrusión bowden Formato de impresión Grande Mal calentamiento en la cama	Doble eje Z

Considerando las características de cada una de las máquinas mencionadas; Las pruebas de fabricación se realizan en la impresora modelo Ender 3, asimismo, es necesario considerar otros factores que permiten obtener resultados óptimos. Los parámetros o ajustes que se deben considerar permiten modificar su resistencia mecánica, el tiempo de fabricación, la calidad de impresión, los materiales requeridos en cada uno de los casos y finalmente realizar un análisis comparativo entre los modelos de FDM (modelos fabricados) y DLP (modelo base).

3.1 Condiciones por considerar

Para la visualización del modelo proporcionado, se utilizó el Software InVesalius, este permite segmentar tomografías dentales, generar modelos 3D de acuerdo con la selección de huesos o esmaltes seleccionados y extraer un diseño 3D en formato STL (por sus siglas en inglés, Stereolithography) con la finalidad de corroborar las medidas generadas directamente del modelo generado por la tomografía.

- **Orientación**

La orientación en la que se realiza una impresión 3D afecta directamente las propiedades físicas de la pieza final, como su resistencia mecánica, el acabado estético, tiempo de fabricación, etc., considerando primordialmente la adherencia entre las capas, cubriendo una mayor superficie colocando los diseños de forma diagonal, eliminando la mayor área de soportes aprovechando el ángulo y aumentando el área de adherencia de cada capa.

- **Selección de material**

Los modelos impresos en 3D dependen de diversos factores, como lo es la estructura poligonal del diseño, los parámetros de impresión, los laminadores y además el mantenimiento mecánico de la máquina. Para el diseño de guías quirúrgicas, segmentación y modelado de prótesis dentales se suele utilizar Meshmixer [18] y Blender [19]. Mientras que los laminadores para impresión 3D más utilizados son: Ultimaker Cura y Simplify 3D. Los materiales para impresión 3D en odontología con mejores propiedades físicas para uso en odontología se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades de los polímeros.

Tipo de filamento	Ventajas	Desventajas	Ajustes importantes
“PLA” Poliácido Láctico	Fácil de imprimir Muy estable Altas velocidades de impresión Bio-compatible Ecológico Reciclable	Poca resistencia mecánica Poca resistencia térmica Sensible a la humedad	Vel: + 100 mm/s Temp: 180 – 210 Cama caliente: 45 grados Fan: 100% Recomienda uso de laca
“PET” Tereftalato de polietileno	Alta transparencia Resistencia a la corrosión Resistencia química Resistencia a impactos Impermeable Alta flexibilidad Resistencia a ácidos, bases y grasas Grado alimenticio	Niveles medios de toxicidad No es biodegradable Endeble a los 70 grados	Vel: 40/50 mm/s Temp: 230 – 260 Bed: 30 – 50 Fan: 00 Uso de laca Filamento de certificado
“PETG” Tereftalato de polietileno Glicol	Mayor durabilidad Mayor dureza Excelente adhesión entre capas Mayor tolerancia a la torsión Fácil de imprimir Resistencia a impactos Buena estabilidad térmica	Se reblandece a los 80 grados Sufre de “Hilos”	Vel: 40/50 mm/s Temp: 230 – 260 Bed: 30 – 50 Fan: 00 Uso de laca

Se usarán dos tipos de polímeros, los cuales cumplen con las características necesarias para poder fabricar guías quirúrgicas; mientras que el PLA es biocompatible, presenta diversos inconvenientes como fragilidad, poca resistencia mecánica e hidrofobicidad (degradación por el agua) [25], el PETG cuenta con una alta resistencia química, resistencia a la abrasión, biocompatibilidad, resistente a las altas temperaturas por lo cual es perfecto para la fabricación de guías quirúrgicas [26].

- **Parámetros de impresión**

Las pruebas se realizan en dos impresoras 3D, una de tipo FDM y la otra de tipo DLP, para su posterior comparativa, para el tipo FDM se utilizó una Ender 3 mientras que del tipo DLP se utiliza una Halot One. La configuración de parámetros para la impresora DLP se determina de manera automática mediante el Software Lychee Slicer [27] mientras que los parámetros utilizados para el modelo FDM, se utiliza el Software Ultimaker Cura [28], en el cual es posible una mayor personalización.

Los parámetros propuestos influyen directamente en la calidad de impresión, por lo que es necesario identificar las posibles consecuencias al modificar en mayor o menor medida el valor recomendado, es decir, dos posibles resultados al modificar cada uno de estos. Estos parámetros se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Variación de parámetros.

Parámetro	Valor menor	Valor mayor	Valor recomendado
Altura de capa	< el radio del diámetro de la boquilla genera sobre extrusión, ocasionando atascos, desprendimiento de la pieza a la cama.	> el radio del diámetro de la boquilla genera poca adherencia entre las capas, pieza quebradiza.	A = r – 10% D r = Radio boquilla D= diámetro boquilla A= Altura de capa
Grosor de pared	1 a 2 capas, la pieza se vuelve frágil, absorbe los golpes, débil a esfuerzo mecánico	4 a 5 capas, mayor resistencia mecánica, frágil a impactos	3 capas, resistencia mecánica media, resistencia a impactos media
Relleno	0% a 15%, Absorción a impactos sin dañar la pared exterior.	60% a 100% menor absorción a impactos, dañando la pared exterior.	20% a 50% Absorción considerable para caídas cotidianas
Temperatura	PLA: 160° - 190°: Poca adherencia entre capas, atascos, dañar motor de extrusión. PETG:220° - 230°: Poca adherencia entre capas, atascos, dañar motor de extrusión.	PLA: 220° - 230°: Sobre flujo, atascos, dañar tubo teflón PETG: 260° - 280°: Sobre flujo, atascos, dañar tubo teflón	PLA: 205° - 215° PETG: 245° - 255°
Retracción	0 mm – 2 mm: Hilos en el movimiento de los ejes X y Y	6 mm – 8 mm: Atascos en el cambio de capa, paredes con marcas de costura	3 mm – 5 mm: Sin Hilos ni atascos dependiendo del sistema de extrusión,
Adherencia	Balsa: 0 mm – 50 mm: Poca Adherencia a la cama, puede desprenderse	Balsa: 250 mm – 300 mm: Tiempo muerto, material desperdiciado	Balsa: 80 mm – 150 mm: Buena adherencia, buen porcentaje de material

La Tabla 5 presenta los parámetros más relevantes que permiten modificar la calidad de una impresión 3D, además de que se pueden utilizar en cualquier modelo de máquina 3D de tipo cartesiano.

Tabla 5. Parámetros recomendados según su boquilla.

Parámetro	Boquilla			
Diámetro	0.4 mm	0.3 mm	0.2 mm	0.1 mm
Altura de capa	0.16 mm	0.12 mm	0.08 mm	0.042 mm
Grosor de paredes X – Y - Z	3	3	4	5
Densidad de relleno	10 %	10 %	15 %	25 %
Temperatura	215 grados	210 grados	200 grados	190 grados
Retracción	4.0 mm	3.0 mm	2.0 mm	2.0 mm
Soporte	árbol	árbol	árbol	árbol
Grosor y densidad de soporte	2.0 mm / 50%	2.0 mm / 50%	2.0 mm / 50%	2.0 mm / 50%
Adherencia	Borde / 100 mm	Borde / 100 mm	Borde / 100 mm	Borde / 100 mm

3.2 Aplicación de parámetros

Los parámetros propuestos se aplican en la máquina Ender 3 en su modelo básico. Se realizan un total de 4 pruebas de impresión 3D del biomodelo así como de la guía quirúrgica proporcionada por la clínica. Los modelos fabricados con diferentes boquillas se clasifican en 3 niveles de calidad a excepción del modelo realizado con la boquilla de 0.4 mm, la cual dentro de las impresiones 3D es considerada como perfil de mediana – alta calidad, mientras que para las pruebas realizadas se considera como una calidad poco aceptable. Los parámetros propuestos para impresión en máquinas FDM para la fabricación de guías quirúrgicas se muestran en las Figuras 1, 2, 3 y 4, las cuales llegaron a resoluciones similares a las impresoras DLP.

Figura 1. Impresión 3D de Biomodelo con resolución de 0.045 mm

Figura 2. Impresión 3D de Guia quirúrgica con resolución de 0.042 mm.

Figura 3. Biomodelo con guía quirúrgica.

Figura 4. Impresión FDM e impresión DLP.

3.3 Métodos de comparación

Al obtener las impresiones finales con cada uno de los parámetros propuestos, se requiere obtener una medición que permita identificar la diferencia en cada uno de los ejes (X, Y y Z) y así corroborar los ajustes que se determinaron anteriormente en la máquina, como se muestra en las Figuras 5, 6, 7, 8 y 9.

El proceso de comparación se llevó a cabo utilizando el modelo de mayor calidad (0.045 mm) impreso en FDM (Figura 7). Para el primer proceso, se utilizó una cámara fotográfica de alta resolución (64 Mp) para obtener imágenes detalladas en la comparación visual, y la superposición se realizó mediante un algoritmo implementado en Python. El segundo proceso se llevó a cabo utilizando un escáner de alta precisión conocido como Cámara Intel RealSense SR300 y el software especializado RecFusion. La tercera evaluación se llevó a cabo utilizando la cámara fotográfica y el software avanzado de reconstrucción NerF Luma AI. Finalmente, la prueba final se llevó a cabo con la ayuda de Luma AI, donde el diseño 3D escaneado fue sometido a una prueba rigurosa de análisis de desviación utilizando el software especializado GOM Inspect.

Figura 5. Modelo impreso con calidad 0.12 mm.

Figura 6. Modelo impreso con calidad 0.08 mm.

Figura 7. Modelo impreso con calidad 0.045 mm.

Figura 8. Modelo base, impreso con calidad 0.035 mm.

Figura 9. Modelo impreso en impresora DLP con calidad 0.05 mm

4. Resultados

4.1 Análisis del modelo del mercado actual

Se llevó a cabo una investigación con el objetivo de recopilar información sobre los procedimientos actuales utilizados en el campo en cuestión. Como resultado, se ha concluido que en los laboratorios y empresas que se dedican a esta área, se emplean impresoras 3D de resina con una altura de capa de 0.035 mm y una resolución de 4K. No obstante, después de realizar diversas pruebas y previas investigaciones, se logró alcanzar una resolución comparable en máquinas de modelado por deposición fundida (FDM) con una altura de capa de 0.042 mm y una resolución de 2K.
Al fabricar los modelos, se realizaron un total de 3 tipos de comprobación de mediciones

4.2 Resultados de comprobación visual

Esta prueba se realizó para descartar modelos que cuenten con deformaciones debido a un incorrecto ajuste en la máquina o variación en la escala por factores externos a lo planeado. Se utilizó una base fija a una mesa, donde se colocó una cámara, posteriormente se realizó una fotografía en un plano alzado y de esta se realizó un empalme de los modelos fabricados con respecto al modelo proporcionado por la clínica, el cual fue utilizado en un caso clínico de implantología dental. Como se puede observar en las Figuras 10, 11, 12 y 13, las cuales muestran el resultado de dicha superposición de imágenes.

Figura 10. Comparativa modelo base Modelo 0.12 mm

Figura 11. Comparativa modelo base Modelo 0.08 mm.

Figura 12. Comparativa modelo base Modelo 0.08 mm.

Figura 13. Comparativa modelo base Modelo 0.042 mm.

Todos los modelos presentan características físicas similares al momento de hacer la comparación, como las dimensiones, bordes, etc. lo que demostró que la máquina estaba perfectamente calibrada. En cuestión de dimensiones, no presentan deformaciones físicas por lo que se procedió con las siguientes pruebas.

● **Resultados de comprobación por escaneo (SR300)**

Para la reconstrucción mediante escáner 3D, se utilizó el modelo “Intel RealSense RS300”, así mismo se utilizó el Software RecFusion, el cual permite modificar la calidad de escaneo, la selección de zona de escaneo y también una selección inteligente para eliminar superficies que no correspondan al modelo. Una vez que se experimentó con el escaneo, se obtuvo la reconstrucción mostrada en la Figura 14; sin embargo, esta presenta distorsión, por lo que no cumple con las características que se requieren para realizar un análisis de desviación. En la Figura 15 se observa el mismo modelo obtenido, detallando las irregularidades.

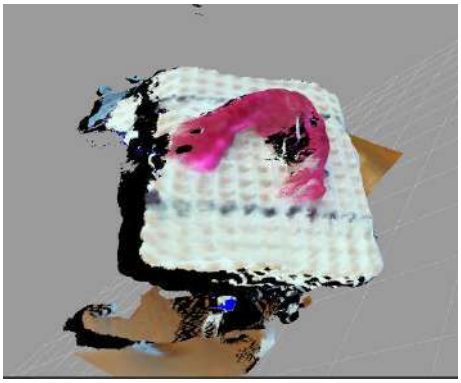


Figura 14. Escaneo mediante RS300.

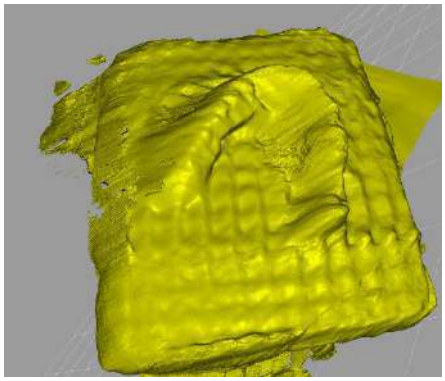


Figura 15. Resultado de reconstrucción mediante RS300

● **Resultado de comprobación mediante Escaneo IA:**

La reconstrucción mediante fotogrametría realizada por la tecnología NeRf se realizó mediante un total de 150 imágenes, donde la IA permite realizar la reconstrucción automática en un modelo 3D como se aprecia en la Figura 16.

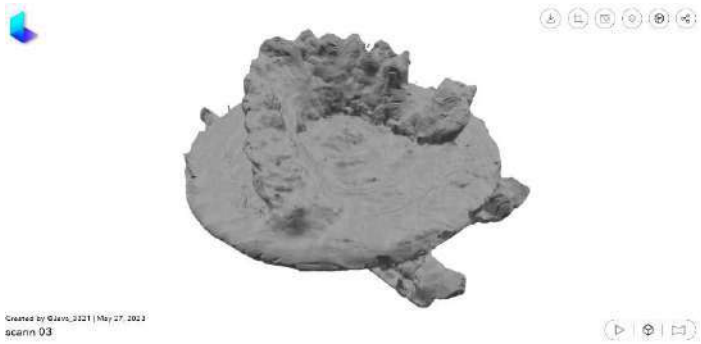


Figura 16. Reconstrucción realizada mediante Luma IA en base a fotogrametría.

● **Análisis de desviación mediante GOM**

Mediante la reconstrucción realizada con Luma AI, se obtuvo un diseño 3D, que cumple con las características requeridas, este análisis permite observar la diferencia entre dos modelos seleccionados, el modelo base, fue el que nos proporcionó la clínica dental, mientras que el modelo secundario lo obtuvimos mediante la fotogrametría de Luma. Mediante el análisis realizado en el Software GOM Inspector se obtuvieron los resultados de la Figura 17.

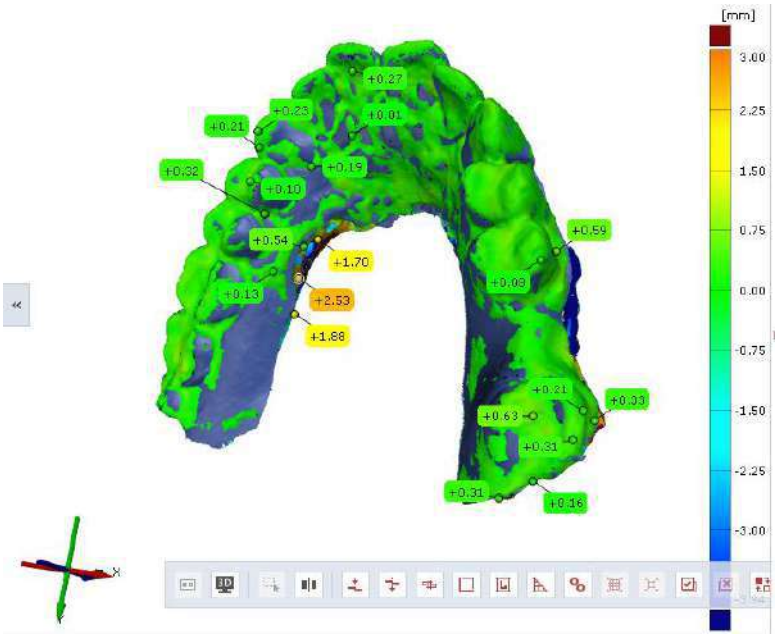


Figura 17. Resultados de desviación con GOM Inspect.

5. Conclusiones

En el presente estudio se explora la fabricación 3D aplicada en implantología dental mediante impresión 3D tradicional FMD como una alternativa a la fabricación por DLP. Se demuestra que la impresión 3D tradicional es capaz de alcanzar una resolución similar a las impresoras 3D de tipo DLP, con las ventajas de la optimización de parámetros, tipo de material, optimización de tiempo y además la escala o formato de impresión el cual, para las impresoras de tipo DLP es limitado.

La evaluación de los modelos fabricados se realiza mediante comprobación visual y a través de la digitalización por escaneo implementando I.A. Se comparan los modelos de referencia proporcionados por la clínica “Fernandez&Nava” y el modelo digitalizado mediante el software GOM Los resultados de la desviación en los modelos fabricados muestran una resolución de 0.042 mm por capa, posicionándose entre los modelos de gama alta (0.035 mm por capa) y gama media (0.050 mm por capa) de impresoras DLP. Finalmente se proponen los parámetros de estandarización para lograr los resultados de resolución obtenidos en este trabajo.

Esta investigación, permite obtener las bases para la automatización de la planeación de guías quirúrgicas. En trabajos futuros se implementarán los biomodelos y las guías quirúrgicas fabricadas en procedimientos quirúrgicos, lo que permitirá validar clínicamente los resultados obtenidos en este trabajo.

Referencias

[1] Parrales, K. G. M., Lino, E. A. M., & Hernández, M. M. O. (2021). Impresión 3D como eje de desarrollo en la industria 4.0. *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, *14*(4), 151-160.

[2] César-Juárez, Á. A., Olivos-Meza, A., Landa-Solís, C., Cárdenas-Soria, V. H., Silva-Bermúdez, P. S., Suárez Ahedo, C., ... & Ibarra-Ponce de León, J. C. (2018). Uso y aplicación de la tecnología de impresión y bioimpresión 3D en medicina. *Revista de la Facultad de Medicina (México)*, *61*(6), 43-51.

[3] Vera García, A. (2012). *Protocolo de calibración y optimización mecánica de una impresora 3D open source* (Bachelor's thesis).
[4] Johnson, A., Jani, G., Carew, R., & Pandey, A. (2021). Assessment of the accuracy of 3D printed teeth by various 3D printers in forensic odontology. *Forensic Science International*, *328*, 111044.
[5] Neumeister, A., Schulz, L., & Glodecki, C. (2017). Investigations on the accuracy of 3D-printed drill guides for dental implantology. *International Journal of Computerized Dentistry*, *20*(1).
[6] l'Alzit, F. R., Cade, R., Naveau, A., Babilotte, J., Meglioli, M., & Catros, S. (2022). Accuracy of commercial 3D printers for the fabrication of surgical guides in dental implantology. *Journal of Dentistry*, *117*, 103909.
[7] Yilmaz, A., Badria, A. F., Huri, P. Y., & Huri, G. (2019). 3D-printed surgical guides. *Annals of Joint*, *4*.
[8] Groover, M. y Zimmers, E. W. J. R. (1983). *CAD/CAM: diseño y fabricación asistida por ordenador*. Educación Pearson.
[9] Davidowitz, G., & Kotick, P. G. (2011). The use of CAD/CAM in dentistry. *Dental Clinics*, *55*(3), 559-570.
[10] Bibb, R., Eggbeer, D., Evans, P., Bocca, A., & Sugar, A. (2009). Rapid manufacture of custom-fitting surgical guides. *Rapid Prototyping Journal*, *15*(5), 346-354.
[11] Juneja, M., Thakur, N., Kumar, D., Gupta, A., Bajwa, B., & Jindal, P. (2018). Accuracy in dental surgical guide fabrication using different 3-D printing techniques. *Additive Manufacturing*, *22*, 243-255.
[12] Arcos Soto, C. A. (2023). Formulación de una resina de impresión 3D biocompatible para elaboración de guías quirúrgicas con resistencia a la degradación por luz UV.
[13] Tian, Y., Chen, C., Xu, X., Wang, J., Hou, X., Li, K., ... & Jiang, H. B. (2021). A review of 3D printing in dentistry: Technologies, affecting factors, and applications. *Scanning*, *2021*.
[14] Ashtankar, K. M., Kuthe, A. M., & Rathour, B. S. (2013, November). Effect of Build Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyping (Fused Deposition Modelling) Made Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Parts. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 56406, p. V011T06A017). American Society of Mechanical Engineers.
[15] D'Amico, A. A., Debaie, A., & Peterson, A. (2017). Effect of layer thickness on irreversible thermal expansion and interlayer strength in fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, *23*, 943-953.
[16] Es-Said, O. S., Foyos, J., Noorani, R., Mendelson, M., Marloth, R., & Pregger, B. A. (2000). Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples. *Materials and Manufacturing Processes*, *15*(1), 107-122.
[17] Afzali Naniz, M., Askari, M., Zolfagharian, A., & Bodaghi, M. (2022). 4D printing: a cutting-edge platform for biomedical applications. *Biomed Mater*.
[18] Saravia-Rojas, M., Gutiérrez-Trevejo, J., Fukuhara-Nakama, M., & Velásquez-Huaman, Z. (2021). Autodesk Meshmixer usado en la enseñanza de la odontología: Es posible?. *Revista Estomatológica Herediana*, *31*(4), 323-329.
[19] Hendriyani, Y., & Amrizal, V. A. (2019, November). The Comparison Between 3D Studio Max and Blender Based on Software Qualities. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1387, No. 1, p. 012030). IOP Publishing.
[20] Taczała, J., Czepułkowska, W., Konieczny, B., Sokołowski, J., Kozakiewicz, M., & Szymor, P. (2020). Comparison of 3D printing MJP and FDM technology in dentistry. *Archives of Materials Science and Engineering*, *101*(1), 32-40.
[21] Hromadnik, V., Pieralli, S., Spies, B., Beuer, F., & Wesemann, C. (2019). Accuracy of a workflow using sleeveless 3D printed surgical guides made from a cost-effective and biodegradable material: An in vitro study. *Clin. Oral Implant. Res*, *30*, 519.
[22] Linares, D., & Smith, D. (2021). *Revisión literaria sobre el uso de guías quirúrgicas versus la técnica a mano alzada para la colocación de implantes dentales* (Doctoral dissertation, Santo Domingo: Universidad Iberoamericana (UNIBE)).
[23] Shaik, Y. P., Schuster, J. y Shaik, A. (2021). Una revisión científica sobre varias extrusoras de pellets utilizadas en procesos fdm de impresión 3D. *Revista de la Biblioteca de Acceso Abierto*, 8(*8*), 1-19.
[24] Martínez Fernández, C. (2021). Diseño y desarrollo de un novedoso cabezal para impresión 3D de metal con AMD technology.

[25] Shilov, S. Y., Rozhkova, Y. A., Markova, L. N., Tashkinov, M. A., Vindokurov, I. V., & Silberschmidt, V. V. (2022). Biocompatibility of 3D-Printed PLA, PEEK and PETG: Adhesion of bone marrow and peritoneal lavage cells. *Polymers*, *14*(19), 3958.
[26] Vijayasankar, K. N., Bonthu, D., Doddamani, M. y Pati, F. (2022). Fabricación aditiva de compuestos cortos de PETG reforzados con fibra de seda. *Materials Today Communications*, *33*, 104772.
[27] Home - Mango 3D. (n.d.). Retrieved August 22, 2023, from https://mango3d.io/
[28] UltiMaker Cura - UltiMaker. (n.d.). Retrieved August 22, 2023, from https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 17, pp. 198 – 210
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Medidor de potencia para sistemas embebidos de bajo consumo

Juárez Ceballos Juan Daniel, Ornelas Vargas Gerardo, Guerrero Osuna Héctor Alonso, Olvera Olvera Carlos Alberto, López Monteagudo Francisco Eneldo y Villagrana Barraza Santiago

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

Resumen

La potencia que consumen algunos sistemas embebidos IoT es muy pequeña, lo que ocasiona que sea difícil conocer con precisión la energía que consumen. En este trabajo se presenta el diseño, desarrollo e implementación de un medidor de potencia para dispositivos de bajo consumo embebido en un FPGA, capaz de medir las pequeñas energías disipadas por un sistema IoT. Los elementos principales que conforman el sistema son: un FPGA, un ADC de 12 bit, un ADC de 24 bit, un amplificador de instrumentación y una resistencia de precisión. El ADC de 12 bit es el encargado de medir el voltaje del sistema embebido. La medición de la corriente se hace a través de la resistencia de precisión, en la cual se determina el voltaje amplificado de la resistencia utilizando el ADC de 24 bit y a través de la ley de ohm se calcula la corriente de la misma, la cual representa la del sistema embebido. Además, se utiliza el FPGA de la tarjeta Basys 3, que embebe el algoritmo encargado del control de los ADC, monitorea el sistema, procesa los datos, y envía los resultados de la energía consumida a una PC conectada a través del puerto UART. Cada segundo se toma 97,656.25 mediciones por cada ADC, durante un periodo de tiempo determinado para obtener un perfil de consumo de energía. En la validación de la precisión, se monitoreo un dispositivo IoT medidor de gas durante una hora, donde se obtuvo un perfil de consumo que estima la duración de las baterías con las que es alimentado, obteniendo resultados similares a una estimación empírica realizada durante varias semanas de monitoreo.

Palabras clave: Potencia, Energía, Medidor, ADC, FPGA, Basys 3, Corriente, IoT.

1. Introducción

La industria 4.0 (I4.0) es un término que inició en Alemania, es mencionada como la cuarta revolución industrial, producida por la evolución de las tecnologías de información cuyo propósito es obtener mayor cantidad de información, esto se realiza con dispositivos que tienen sensores y funcionan de forma independiente conectados a Internet. La I4.0 vuelve más eficiente el consumo de energía y ayuda a reducir la huella de carbono [1][2][3][4].

El consumo de energía global ha ido cambiando, se estima que la energía para crear circuitos integrados aumentará de 2 a 35 para el año 2025, pero la energía operativa disminuirá considerablemente gracias algunas circunstancias, entre ellas está la creación de dispositivos de bajo consumo [5][6].

El Internet de las cosas (IoT) enfrenta distintos desafíos, uno de ellos es la eficiencia energética. Los dispositivos IoT están diseñados para funcionar de forma remota sin intervención, contienen baterías de las que depende su funcionamiento, por ello, estimar su consumo energético es de vital

importancia [7]. La cantidad de dispositivos IoT va aumentando con el tiempo al igual que la dependencia de la sociedad hacia estos dispositivos [8]. Algunos dispositivos se encuentran en lugares de difícil acceso o alto riesgo, lo que ocasiona que el costo operativo aumente por el hecho de cambiar de baterías, en este contexto se vuelve indispensable conocer el rendimiento de la batería [9].

Naser Hossein Motlagh [10] menciona que la eficiencia energética ayuda a la sustentabilidad; es esencial para el medio ambiente, además de ofrecer un beneficio económico. Yee Shee Tan [11] indica que el primer paso para obtener mayor eficiencia energética es generar un perfil de consumo energético de los dispositivos en tiempo real, de esta forma, es posible aplicar métodos de ahorro energético.

En Dariusz PALMOWSKI et al. [12] proponen medir cantidades pequeñas de potencia colocando una resistencia en serie con la carga para determinar la corriente que se consume con un voltaje constante, para así poder calcular la energía que consume el componente. El medidor fue probado con tres tipos de cargas: un sensor multiparamétrico, un microcontrolador de baja potencia y un módulo bluetooth. Como resultado, se adquirieron los perfiles de consumo de corriente para diferentes configuraciones, lo que les permitirá diseñar un consumo de energía controlado.

Actualmente existen algunos medidores comerciales de pequeñas corrientes, que manejan propósitos u objetivos diferentes, la información que proporciona puede ser muy limitada ya que no se conoce el tiempo de respuesta o el pico de corriente. Un ejemplo de estos medidores se muestra en la Figura 1, al cual se le conoce como Current Ranger, un medidor de corriente de bajo ruido y alta precisión, para dispositivos de bajo consumo en la escala de nA, uA y mA, utiliza una resistencia diferente para sus tres modos de funcionamiento, 10 mΩ, 10 Ω, 10 kΩ, además tiene buena resolución ya que la detección analógica la realiza el procesador SAMD21G18 ARM Cortex M0+ que muestrea la salida a través de su Convertidor Analógico Digital (ADC) de 12 bit [13].

Figura 1. El Current Ranger.

En la Figura 2, se presenta otro medidor conocido como µCurrent GOLD [14], cuya función es mejorar la medición de corriente, capaz de medir igual en tres rangos de nA, uA y mA, es mencionado como el mejor comparado con el multímetro Fluke. Las resistencias que utiliza en sus rangos son; nA: 10MΩ, µA: 1kΩ y mA: 10Ω. No cuenta con un ADC, convierte la corriente a voltaje, que luego se puede medir con un multímetro digital u osciloscopio.

Figura 2. µCurrent GOLD.

En la Figura 3, se muestra el Power Profile Kit II. Esta herramienta es capaz de medir y analizar el consumo de energía de un dispositivo de bajo consumo en tiempo real, puede medir desde nA hasta A, además cuenta con su propio software [15].

Figura 3. Power Profile Kit II.

Este trabajo presenta el diseño, desarrollo e implementación de un medidor de potencia para dispositivos de bajo consumo embebido en un FPGA, para mejorar, facilitar y ahorrar tiempo en las mediciones de energía, la singularidad radica en la medición, la cantidad de mediciones obtenidas, la sincronización y control de dos ADC. Todas las mediciones se realizan con un prototipo construido para un algoritmo que se diseñó, la cantidad de tiempo de medición que puede realizar va desde un segundo hasta un día que depende de la selección del usuario.

El documento está estructurado de la siguiente manera: la Sección 2 muestra los materiales principales utilizados, los describe y muestra su funcionamiento, explica la función del algoritmo y cómo se diseñó. La Sección 3 muestra el resultado de mediciones y el prototipo utilizado. En la Sección 4 se realiza una discusión de resultados.

2. Materiales y métodos

Es necesario construir un circuito en un PCB para conectar los periféricos al FPGA, los componentes principales se muestran en la Tabla 1, se eligieron debido a su desempeño en velocidad y precisión, los componentes secundarios son igual de importantes, pero estos ayudan a que los principales funcionen correctamente (resistencias, capacitores, fuentes…).

Tabla 1. Materiales principales.

Descripción	Núm. fabricante	Cantidad
ADC 12 bit	LTC2360IS6#TRMPBF	1
ADC 24 bit	ADS1271IPWR	1
Amplificador	AD8421ARZ-R7	1
Basys 3	410-183	1
Resistencia 0.240Ω	KDV06DR240ET	1

Software requerido

- **Vivado:** El código es escrito en lenguaje de descripción de hardware (HDL) Verilog y este programa se utilizará para sintetizar.
- **Programa para diseño de PCB:** Para realizar este trabajo se creará un prototipo funcional, este software lo utilizaremos para diseñar y armar la placa del circuito.

- **Tera Term:** Será necesario visualizar la terminal serial, se utilizará para visualizar los datos de salida que se envían hacia la computadora por comunicación UART.

2.1 Diseño del Medidor de Potencia

El propósito del medidor de potencia es que muestre la energía que la carga consumirá de una fuente de voltaje en un tiempo definido, se realiza por medio de muestras de potencia durante un lapso de tiempo. Se tomarán las mediciones como se presenta en la Figura 4, la fuente de voltaje puede ser una batería o una fuente fija y la carga es el dispositivo que se requiere conocer su consumo de energía.

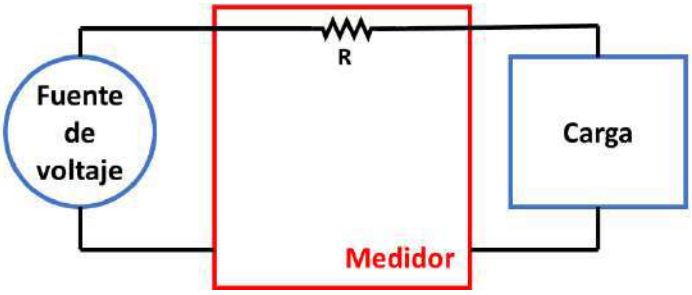


Figura 4. Diagrama de la conexión del medidor de potencia con la fuente de voltaje y la carga.

2.2 Dentro del Medidor

Dentro del medidor de potencia están los materiales que aparecen en la Tabla 3.1, son los principales y están conectados como se muestra en la Figura 5.

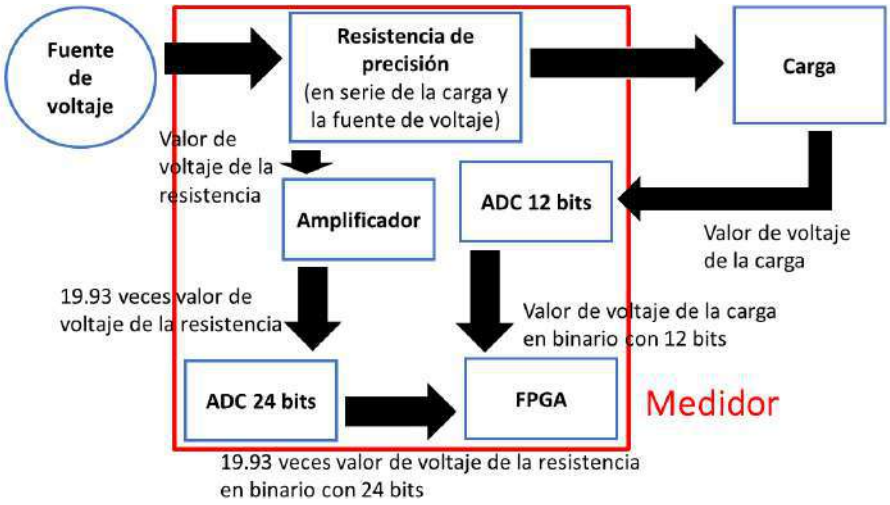


Figura 5. Diseño del medidor de potencia.

La resistencia de precisión tiene un valor de 0.240Ω y 0.5% de tolerancia de error, con el objetivo de evitar una caída de voltaje que afecte en la medición. Antes de obtener el voltaje de la resistencia, esta es amplificada 19.93 veces con un amplificador de precisión (AD8421ARZ-R7), después se convierte de analógico a digital con el ADC de 24 bit (ADS1271IPWR) y es obtenido con el FPGA. Esta medición debe ser lo más precisa que se pueda ya que la corriente puede ser muy variable. El voltaje de la carga es tomado y convertido de analógico a digital con el ADC de 12 bit (LTC2360IS6#TRMPBF), e igual se obtiene con el FPGA y este se encargará en realizar las operaciones correspondientes para obtener el consumo de energía.

2.3 *Cálculo para la potencia*

La ecuación 1 se utiliza para medir la energía:

$$Energía \ = \int_{t_a}^{t_b} P(t_i^*)\, dt \tag{1}$$

Dónde:
t_a = Tiempo a
t_b = Tiempo b
$P(t_i^*)$ = Potencia

Con las Sumas de Riemann reescribimos la ecuación:

$$Energía \ = \sum_{i=1}^{n} P(t_i^*)\, \Delta t \tag{2}$$

Dónde:
n = Numero de muestras
$P(t_i^*)$ = Potencia

Con la fórmula de la potencia P = V*I volvemos a reescribir la ecuación:

$$Energía \ = \sum_{i=1}^{n} V(t_i^*) * I(t_i^*)\, \Delta t \tag{3}$$

Dónde:
$V(t_i^*)$ = Voltaje en un tiempo
$I(t_i^*)$ = Corriente en un tiempo
$\Delta t = \frac{t_b - t_a}{n}$ = λ
$t_i = t_a + i\Delta t$
n = número de muestras

El periodo de muestreo (λ), cada vez que se toman mediciones con los ADC, un segundo es el mínimo de tiempo que se puede realizar un ciclo de medición de energía.

$$\lambda = \frac{t_b - t_a}{n} = \frac{1 - 0}{97.65625 * 10^3} = 10.25\mu s$$

Tabla 2. Muestras que se toman en el tiempo.

Segundos	Min	Horas	Muestras
1	0.016 666 67	0.000 277 78	97 657
10	0.166 666 67	0.002 777 78	976 563
60	1	0.016 666 67	5 859 375
600	10	0.166 666 67	58 593 750
3600	60	1	351 562 500
86400	600	24	8 437 500 000

2.4 *Voltaje de la carga*

El ADC de 12 bit en cada medición convierte el voltaje de la carga analógica a digital en bits que están entre 0 a 4095, este valor en bits es equivalente de 0 a 3.3V, porque el ADC tiene un Voltaje de

referencia (V_{ref}) de 3.3V, la ecuación 4 se utiliza para convertir directamente de bits a su equivalente en voltaje.

$$V_{in} = Código\ binario * \frac{V_{ref}}{(2^n - 1)} \quad (4)$$

Dónde:

n = número de bits
V_{in} = voltaje de entrada
V_{ref} = voltaje de referencia
$Código\ binario$ = Salida del ADC

Llenamos los valores correspondientes al ADC de 12 bit:

$$V_{in} = Código\ binario * \frac{3.3V}{(2^{12} - 1)}$$

$$V_{in} = Código\ binario * Cte1 \quad (5)$$

Dónde:

$$Cte1 = \frac{3.3V}{(2^{12} - 1)}$$

Para obtener V_{in} en cada medición solo cambia el código binario y el resto lo podemos poner en una constante a la que llamaremos Constante 1 ($Cte\ 1$) y cuando volvamos a calcular V_{in} solo multiplicaremos el código binario con “Cte1”.

$$Cte\ 1 = 0.805860805x10^{-3}$$

2.5 Corriente de la carga

El voltaje de la resistencia es amplificado con un amplificador de 19.93, después pasa al ADC de 24 bit que lo convierte a digital en el que los bits de salida están entre 0 a 8388607, estos bits son equivalentes de 0 a 2.5V, porque tiene V_{ref} de 2.5V. El ADC de 24 bit es diferencial, entonces el bit más significativo del ADC de 24 bit es el signo, en este caso solo se utilizará la parte positiva.

Utilizando la ecuación 4 llenamos los valores correspondientes al ADC de 24 bit y V_{in} es amplificado, entonces tenemos:

$$V_{in} = Código\ binario * \frac{2.5V}{(2^{23} - 1) * (19.93)}$$

La ecuación 6 es la ley de ohm, la podemos utilizar para calcular la corriente de la resistencia que es igual al de la carga:

$$I = \frac{V}{R} \quad (6)$$

Dónde:

I = Corriente
V = Voltaje
R = Resistencia

$$I * R = Código\ binario * \frac{2.5V}{(2^{23} - 1) * (19.93)}$$

$$I = Código\ binario * \frac{\frac{2.5V}{(2^{23}-1)*(19.93)}}{0.240\Omega}$$

Cada vez que realicemos la medición de corriente lo único que cambia es el código binario, entonces podemos crear una constante a la que llamamos Constante 2 ($Cte2$) y solo la multiplicaremos con el código binario.

$$I = Código\ binario * Cte2 \tag{7}$$

Donde:

$$Cte2 = \frac{\frac{2.5V}{(2^{23}-1)*(19.93)}}{0.240\Omega}$$

$$Cte2 = 62.30625092x10^{-9}$$

2.6 Código para el control de los ADC

El código para el control del medidor de potencia está escrito en Verilog y está hecho como se muestra en la Figura 6. Los bloques con X son multiplicadores, con G son registros que guardan un valor cuando se le pide, todos los bloques activados con flanco de reloj utilizan la señal “clk” (con minúsculas), los círculos con números son conectores, el bloque FSMADC es el bloque más importante de control, se encarga de sincronizar todos los demás bloques y el bloque UART es el encargado de realizar la comunicación serial con la computadora.

Este código trabaja solo con números enteros, así que al final se debe añadir el punto decimal, la salida que es representada por la variable “h” se debe multiplicar por 1*10^{-37}, este número resulta de la suma de los ceros que se les añadieron a las constantes, en Cte1 es 10^{-12}, Cte2 10^{-17} y Δt 10^{-8}.

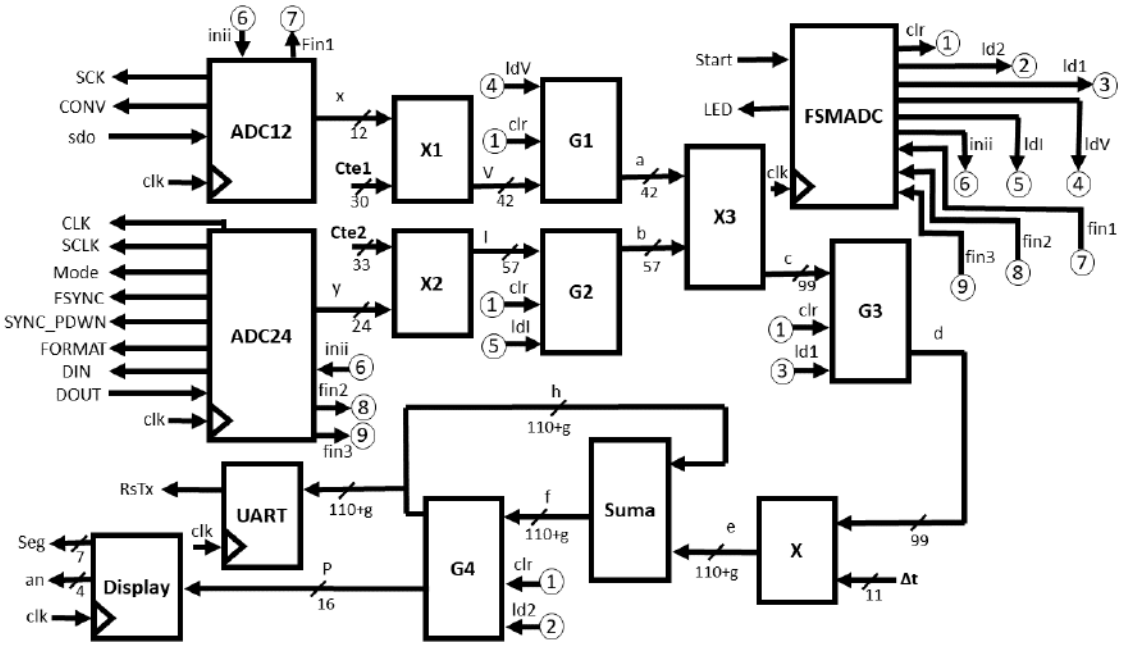


Figura 6. Diseño del medidor de potencia.

El parámetro “g” que aparece en la Figura 6, son los bits restantes que se necesitan para efectuar las sumas, es para que no queden los números más grandes que sus contenedores de bit.

Los bloques ADC12 y ADC24 que aparecen en la Figura 6 son los que se encargan del control de los ADC y estos replican las señales necesarias para garantizar su buen funcionamiento, como aparecen en las Figura 7 y Figura 8, para un mejor entendimiento de estas señales se recomienda leer la hoja de datos de los ADC [16][17].

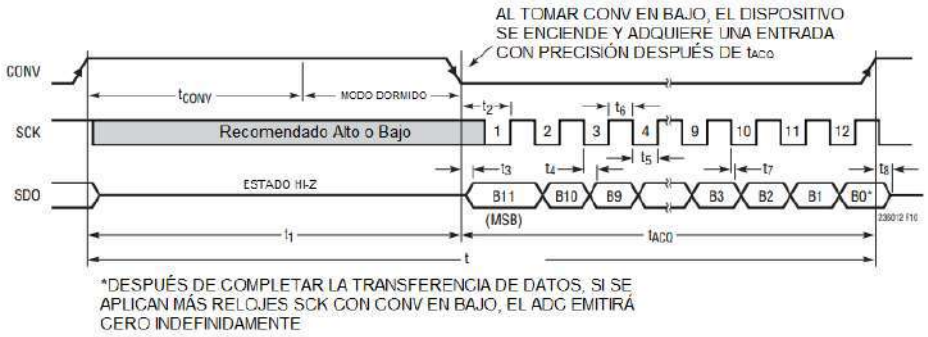


Figura 7. Diagrama De Interface Serial De Tiempo Para El ADC De 12 (LTC2360IS6#TRMPBF) [16].

Las señales para el control del ADC de 12 bit que aparecen en la Figura 7 son: “CONV” entrada que debe permanecer en alto y solo cuando mide debe permanecer en bajo, “SCK” señal de entrada de reloj que sincroniza la salida de los bits, “SD0” es una salida dónde salen los 12 bit en serie.

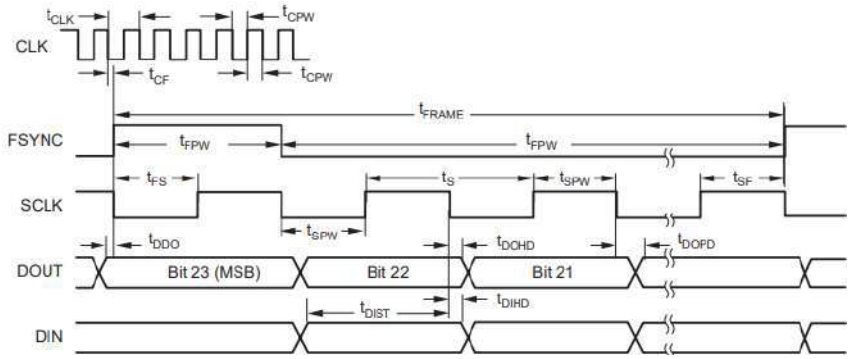


Figura 8. Características de tiempo: formato de sincronización de cuadro para el ADC de 24 bit [17].

Las señales para el control del ADC de 24 bit que aparecen en la Figura 8 son: “CLK” es la señal de reloj para la sincronización, “FSYNC” es señal de inicio que debe cambiar de bajo hacia alto y durante la medición baja pero no vuelve a subir hasta la siguiente medición, “SCLK” es la señal para sincronizar la salida de los bits (esta señal debe pasar 64 veces antes de comenzar otra medición), “DOUT” es dónde salen los bits en serie, “DIN” se utiliza para sincronizar varios ADC. Las primeras 298 mediciones son erróneas y cuando se saca más de una medición deben ser continuas si no se desincroniza.

3. Resultados

3.1 Prototipo

Para probar el funcionamiento se diseñó un prototipo como se presenta en la Figura 9, en el diseño se pueden observar los componentes principales y los componentes secundarios conectados.

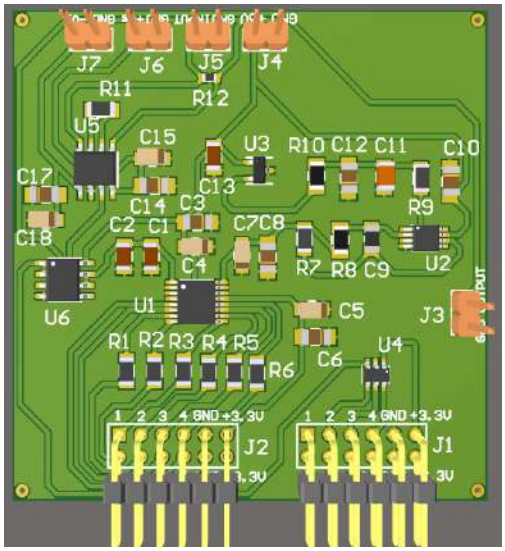


Figura 9. Diseño del prototipo.

En la Figura 10 se observa una foto del prototipo construido en el que se implementó el algoritmo.

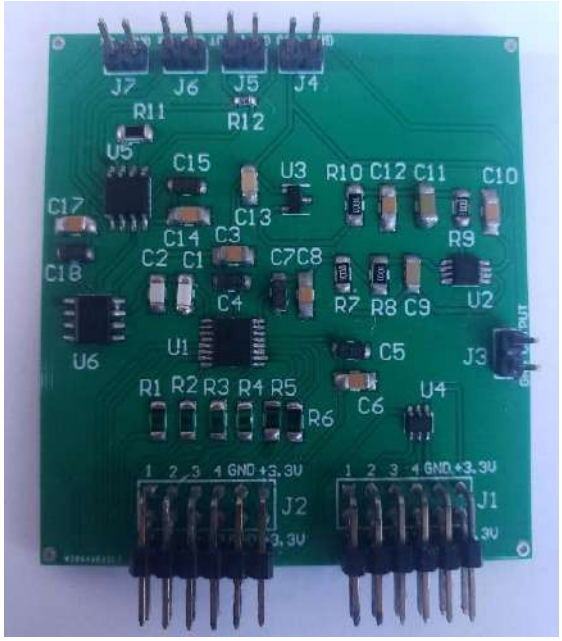


Figura 10. Prototipo.

3.2 Comparación de las mediciones realizadas contra mediciones hechas con un equipo comercial.

Para validar las mediciones se compara con un equipo comercial, el Current Ranger, ya que es el que tenemos a la mano. Se mide la corriente que consume el Arduino pro mini simplemente encendido sin ningún periférico y un código en blanco para que su consumo sea constante. Nuestro medidor puede mostrar un valor de un instante de tiempo, entrega los valores en hexadecimal y deben ser convertidos como se explica en la subsección 2.5. El Current Ranger a diferencia del nuestro tiene una pantalla dónde se muestran los valores, si la corriente es variable es difícil notar los cambios rápidos. En la Tabla 3 se muestra la comparación de mediciones de corrientes.

Tabla 3. Comparación de mediciones de corriente.

Current Ranger	Nuestro Medidor		
Corriente	**Hexadecimal**	**Decimal**	**Corriente (Decimal*Cte2)**
4.8-5.6mA	15E7E	89726	0.00559A
4.8-5.6mA	1563F	87615	0.005459A
4.8-5.6mA	15AA0	88736	0.005529A
…	…	…	…
4.8-5.6mA	15BA4	88996	0.005545A
4.8-5.6mA	15E73	89715	0.0055898A

3.3 Mediciones de Potencia

Para probar el funcionamiento del medidor de potencia se midió un sistema embebido que ya se había estimado su consumo como se muestra en la Figura 11, el dispositivo que se midió es un medidor de gas, empieza en un estado dormido, despierta, toma la medición, la manda por internet y vuelve a dormir, el tiempo que tarda en volver a medir depende de una resistencia, en este caso mandaba la medición cada minuto.

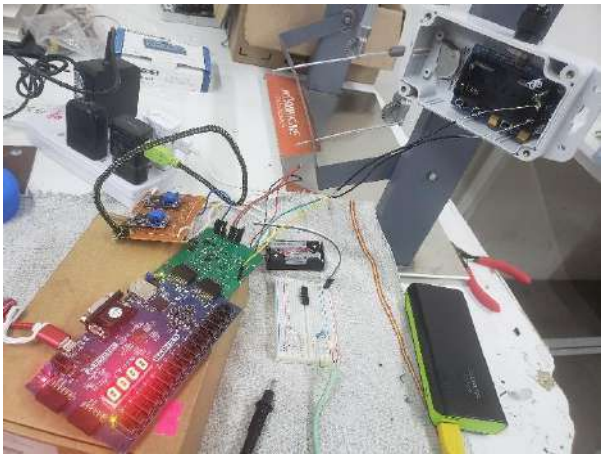


Figura 11. Foto del medidor de potencia tomando mediciones

Primero se comprobó que cada ADC funcionara correctamente, se toman los valores que arroja cada ADC en hexadecimal y se multiplica con su respectiva constante, como se explica en la subsección 2.4 y 2.5, para calcular la corriente y voltaje como se muestra en la Tabla 4 y en la Tabla 5.

Tabla 4. Mediciones de voltaje con ADC de 12 bit.

Medición		Decimal * Cte1
Hexadecimal	**Decimal**	**Voltaje (V)**
E58	3672	2.95912087596
E5B	3675	2.961538458375
E58	3672	2.95912087596
E54	3668	2.95589743274
E35	3637	2.930915747785

Tabla 5. Mediciones de corriente con ADC de 24 bit.

Medición		Decimal * Cte2
Hexadecimal	**Decimal**	**Corriente (A)**
16C9	5833	0.00036343236161636
16E6	5862	0.00036523924289304
33338	209720	0.0130668669429424
1718	5912	0.00036835455543904
16E9	5865	0.0003654261616458

Se debe conocer cuánta energía pueden proporcionar las baterías al sistema embebido, utiliza como fuente 2 baterías de 1.5V y cómo pueden variar un poco se calcula la energía que puede proporcionar la batería como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Potencia calculada de las baterías.

	Medido			Wh Batería
2 baterías AA	**V**	**I mAh**	**I Ah**	
Energizer	2.95V	2000mAh	2Ah	5.9Wh

Se realizó la medición de energía durante una hora y los datos como se muestra en la Tabla 7. La medición se obtiene en Tera Term en hexadecimal, se convierte a decimal, se le añade el punto decimal como se explica en la subsección 2.6, la medición está en Watts segundo (Ws), tiene 97656.25 muestras cada segundo de medición y se van sumando. Para convertir a Watts hora (Wh) solo se debe dividir Ws entre 3600.

Tabla 7. Energía medida durante 1 hora.

Hexadecimal	Valor Decimal	Ws = Valor Decimal * 1E-37	Wh = Ws/3600
00001DE74C280FB3CD00000000 0000000000	39748577089200124548086856063448514560	3.9748577089200126Ws	0.0011041271413666702Wh

Para calcular el tiempo en horas que duran las baterías en el sistema embebido, dividimos la energía de las baterías entre la energía que medimos durante una hora y para pasar a días dividimos el resultado anterior entre 24, los resultados están en la Tabla 8.

Tabla 8. Duración de las baterías en el sistema embebido.

Wh Batería /Wh Dispositivo	Días
5343.587508135231 Horas	222.64947950563462 Días

4. Conclusiones

El prototipo creado logra obtener una estimación de consumo de energía del sistema embebido aceptable. Un instrumento como este permite tener mejores modelos de estimación de potencia y consumo de energía, para el sistema embebido que se midió se tienen en cuenta 220 días la cantidad que le dura la carga a la batería, este resultado se obtuvo en 3 meses, mientras que la medición que se

realizó con el medidor de potencia creado fue durante una hora y llegamos al resultado de 222.64 días, es un resultado algo parecido.

Las comparaciones de medición de corriente son aceptables, las mediciones individuales nos indican que están a la par del equipo comercial Current Ranger.

Para la construcción del medidor de potencia se eligieron las piezas con la mayor precisión dentro del presupuesto disponible, es lo más preciso posible hasta el término de los materiales que se eligieron. Es muy útil cómo herramienta de apoyo y es fácil de utilizar. Notamos que los resultados pueden mejorar mientras más tiempo duren las mediciones, entre más mediciones se comparan los errores se van reduciendo.

Conociendo la cantidad de energía que consume un dispositivo se pueden crear estrategias que optimicen el consumo y comprobar cuál estrategia es mejor. La construcción de mejores aparatos que ayuden a medir lo eficiente que son respecto al consumo de energía, permite que se creen más dispositivos que consuman menos energía, la programación de los mantenimientos se puede hacer de una manera más eficiente, facilita que los dispositivos sean utilizados en lugares con difícil acceso, que sean más pequeños, livianos y mucho más accesibles económicamente.

Referencias

[1] Bhagwan N. and Evans M. *"A review of industry 4.0 technologies used in the production of energy in China, Germany, and South Africa"*, Journal of Cleaner Production. Elsevier, vol 173, 2023. Disponible: https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100408

[2] Ghobakhloo M.and Fathi M. *"Industry 4.0 and opportunities for energy sustainability"*, Sustainable Energy, Grids and Networks. Elsevier, vol 295, 2021. Disponible: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126427

[3] Shen M., Sinha A., Hu K. and Ibrahim M. *"Impact of technological innovation on energy efficiency in industry 4.0 era: Moderation of shadow economy in sustainable development"*, Technological Forecasting and Social Change. Elsevier, vol 164, 2021. Disponible: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120521

[4] De Val R. *"Industria 4.0: la transformación digital de la industria"*, noticia, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Deusto, 2016. Disponible: https://coddii.org/wp-content/uploads/2016/10/Informe-CODDII-Industria-4.0.pdf

[5] Das S. and Mao E. *"The global energy footprint of information and communication technology electronics in connected Internet-of-Things devices"*, Sustainable Energy, Grids and Networks. Elsevier, vol 24, 1-12, 2020. Disponible: https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100408

[6] IoT Trend Watch, IHS Markit, 2018. Disponible: https://cdn.ihs.com/www/pdf/IoT-Trend-Watch-eBook.pdf

[7] Dibal P., Onwaka E., Zubair S., Nwankwo E., Okoh S. Salihu B. and Mustaphab H. *"Processor power and energy consumption estimation techniques in IoT applications: A review"*, *Internet of Things*. Elsevier, vol. 21, 2023. Disponible: https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100655

[8] García M., Molina H., Cornejo M., Moreno S., and Alvarado J. *"Internet de las cosas"*, *TEPEXI Boletín Científico De La Escuela Superior Tepeji Del Río*, vol.7, 46-51, 2020. Disponible: https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/tepexi/article/view/5698/7289

[9] Thouti S., Venu N., Rinku D., Arora A. and Rajeswaran N. *"Investigation on identify the multiple issues in IoT devices using Convolutional Neural Network"*, *Measurement: Sensors*. Elsevier, vol. 24, 100509, 2022. Disponible: https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100509

[10] Hossein N., Mohammadrezaei, Caza J., & Zakeri, B. (2020). *"Internet of Things (IoT) and the energy sector",* Energies. MDPI, vol.13, pág. 494, 2020. Disponible: https://www.mdpi.com/1996-1073/13/2/494

[11] Tan, Y., Ng, Y and Low J. *"Internet-of-things enabled real-time monitoring of energy efficiency on manufacturing shop floors"*, Procedia. Elsevier, vol. 61, pág. 376–381, 2017. Disponible: https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.242

[12] PALMOWSKI D., LENTKA G., and RUTKOWSKI J. *"A Set of Low-power Microcontroller-based Modules Used for Testing of Small Energy Measurement Methods"*, *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*. SIGMA-NOT, vol. 11, Número, pág. 55-28, 2018. Disponible: https://mostwiedzy.pl/pl/publication/a-set-of-low-power-microcontroller-based-modules-used-for-testing-of-small-energy-measurement-method,147196-1

[13] Lowpowerlab, "Current ranger." https://lowpowerlab.com/guide/currentranger/specs-architecture/, septiembre 2018, Visto en 22/08/202316

[14] Jones D., "µcurrent gold."https://www.kickstarter.com/projects/eevblog/current-gold-precision-multimeter-current-adapter , mayo 2014. Visto en 22/08/2023.

[15] Power Profiler Kit II, https://www.nordicsemi.com/Products/Development-hardware/Power-Profiler-Kit-2. Visto en 23/08/2023 , Visto en 26/09/2023.

[16] LTC2360IS6#TRMPBF, https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/236012fa.pdf , Visto en 26/09/2023.

[17] ADS1271IPWR, https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1271.pdf?HQS=dis-dk-null-digikeymode-dsf-pf-null-wwe&ts=1695710761827&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fgeneral%252Fdocs%252Fsuppproductinfo.tsp%253FdistId%253D10%2526gotoUrl%253Dhttps%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Flit%252Fgpn%252Fads1271 , Visto en 26/09/2023.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 18, pp. 211 - 225
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Controlador de temperatura PI adaptable difuso para un deshidratador de alimentos

Hidalgo Leal Héctor Daniel✉, Martínez Valera Elizabeth, Aquino Bosques Rufino
Escobar Cordova Mario Ismael y Morales Gómez Josué Trinidad

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Villa La Venta, C.P. 86418
Huimanguillo, Tabasco, México.
✉hector.hl@laventa.tecnm.mx

Resumen

Los hornos de deshidratación son importantes en la industria alimentaria para la conservación de los alimentos. La sintonización de controladores clásicos para regular la temperatura es un desafío debido a diversos factores de incertidumbre. En diversas ocasiones, rapidez y respuesta asintótica son prestaciones contradictoras en el diseño de un controlador proporcional integral. En este trabajo se presenta la metodología para el diseño e implementación de un controlador de temperatura para un deshidratador de alimentos. El sistema de calefacción implementado utiliza tres resistencias eléctricas conectadas en delta que aportan una potencia de 3 kW. La propuesta consiste en un controlador Proporcional Integral con ganancias que se adaptan a la respuesta en lazo cerrado. El mecanismo de adaptación es un sistema de lógica difusa tipo mamdani. El método para obtener la identificación del sistema es la respuesta a escalón del sistema. Los resultados experimentales muestran una respuesta dinámica sin sobreimpulso y sin oscilaciones, además de un tiempo de asentamiento más corto en comparación con el controlador proporcional integral clásico.

Palabras clave: Controlador PI, Modelado de deshidratador, Arduino, Controlador difuso, Control de temperatura.

1. Introducción

Los hornos deshidratadores eléctricos suponen un avance en la industria de alimentos para la conservación de materias primas, hablando concretamente de un producto que es altamente demandado como lo es el café [1]. El proceso de secado es una de las etapas más críticas para obtener un producto de alta calidad, así como en otros alimentos es importante tener condiciones homogéneas, sin discrepancias, por lo que es necesario emplear un controlador con respuesta dinámica preestablecida. En la etapa de secado, cualquier daño ocurrido es irreversible, de ahí que este proceso se realiza con el fin de conservar la calidad del grano y disminuir el contenido de humedad. Otro fin es evitar que el fruto sufra daños en su aspecto físico y composición química.

Para el desarrollo de un controlador es necesario tener bien definida la función de transferencia del sistema, en muchas aplicaciones se puede obtener de manera analítica, pero en situaciones practicas puede ser complejo obtener un modelo preciso, para ello, se emplean métodos para identificarlo por medio de mediciones. Una vez identificado el sistema, otro objetivo es ajustar los parámetros del controlador, que muchas veces suele ser un proporcional integral derivativo (PID) debido a su simplicidad. A pesar de existir varios métodos en la literatura para sintonizar controladores, la mayoría tienen desventajas que van desde producir respuestas dinámicas lentas a respuestas con sobreimpulso.

En [2] se propone un método llamado evolución diferencial (ED), fundamentado en la evolución de Darwin y siendo comparado con el método de sintonización Ziegler-Nichols. La finalidad del método

es observar la capacidad de cómputo evolutivo y proponer un método alternativo para la sintonización. Este método se centra en la búsqueda y recombinación de datos obteniendo constantes del controlador adecuadas. Evitando que los operadores y encargados de los lazos de control, seleccionen ganancias para los controladores de una manera heurística y con poca fiabilidad.

Existen controladores PID que se complementan de la lógica difusa buscando respuestas robustas a ruido. En [3] se desarrolla un controlador PI difuso para regulación y seguimiento de trayectoria en un sistema de levitación magnética de un grado de libertad, controlado mediante repulsión magnética, donde el sistema es altamente no lineal.

Otra propuesta se presenta en [4], donde se analiza la optimización de los parámetros PID utilizando el método de comparación de Nelder-Mead (NM) con el enfoque difuso de autoajuste. Este método basado en simplex aplica un enfoque de búsqueda de patrones a lo largo de la búsqueda. El simplex inicial (polígono) pasa por un proceso de reflexión, expansión y contracción hasta minimizar la función. El controlador propuesto ofrece capacidades prometedoras para garantizar la robustez y precisión para el sistema en cuestión.

En [5] los autores proponen un PI difuso para el control de un sistema de nivel de líquido de tanque acoplado. En este sistema en particular se inicia sin un valor concreto en sus variables de control. El controlador se ajusta totalmente por medio de reglas difusas predefinidas. En consecuencia, la ganancia del controlador propuesto está implícitamente adaptada por la variación de las salidas del controlador por lógica difusa (FLC, por sus siglas en inglés). De acuerdo a los resultados se obtuvo un desempeño mejorado comparado con el del controlador PI convencional. La simulación y resultados experimentales indican que el PI difuso adaptable propuesto ofrece un esfuerzo de control reducido.

Para que el deshidratador se comporte de una manera confiable y evitar la perdida del producto, este debe mantener de manera precisa las condiciones de temperatura. Si el sistema en lazo cerrado presenta sobreimpulso puede producir resultados no deseados. El principal problema de un sistema de secado alimentado con corriente alterna, es controlar la potencia que llega al elemento calefactor. Sin embargo, lograr ajustar los valores de un controlador con respuesta rápida y sin sobreimpulso es complejo en la práctica. Como característica general el calor emitido por el calentador mediante convección se propaga lentamente. Es por ello que para mantener estable el sistema se recurre a la heurística.

En el presente trabajo se propone un controlador PI con ganancias que se adaptan a la respuesta del sistema. El mecanismo de adaptación de las ganancias del controlador se consigue por medio de un sistema de lógica difusa tipo mamdani. El propósito del sistema difuso es modificar las ganancias proporcional e integral. Las ganancias se ajustan en proporción al error y la derivada del error, garantizando una eliminación del sobreimpulso y de las oscilaciones.

El controlador propuesto es implementado en una tarjeta Arduino Mega 2560 y como etapa de potencia se utiliza un SSR (relevador de estado solido, por sus siglas en inglés). Adicionalmente se presenta la identificación del sistema obtenida por medios experimentales.

El trabajo se estructura de la siguiente manera. El apartado 2 presenta metodología y materiales, en el cual se describe el modelado dinámico lineal del sistema. También se presenta la identificación de los parámetros del deshidratador usando métodos experimentales. Para la correcta validación de los datos se utiliza el Toolbox System Identifier del software MATLAB. En la misma sección se describen los pasos para el diseño del controlador propuesto.

En la sección 3 se presentan los resultados, incluyendo pruebas para comparar la respuesta del controlador propuesto y de un controlador clásico con diferentes ganancias de control. El trabajo finaliza en la sección 4 donde se presentan las conclusiones y comentarios adicionales.

2. Metodología y materiales

2.1 especificaciones

El tablero de control para el deshidratador eléctrico consta de dos tarjetas de desarrollo Arduino, cada una tiene tareas diferentes. El horno deshidratador cuenta con diferentes niveles de voltaje para su correcto funcionamiento. La red suministra 220 V trifásicos que proporcionan potencia a las resistencias calefactoras, además se tiene una fuente con salida 12 V de corriente directa para alimentar la etapa de control. En la tabla 1 se enlistan los materiales usados.

Tabla 1. Materiales.

Componente	Cantidad	Alimentación	Componente	Cantidad	Alimentación
Resistencia 1000 W	3	220 V	Convertidor reductor LM2596	2	12 V
SSR	1	5 V	Fuente de 12V, 10A	1	220 V
Arduino mega 2560	1	5 V	LCD 16X2 con modulo I2C	2	5 V
Enconder rotativo	1	5 V	MAX6675 con termopar tipo k	1	5 V
Shield de borneras para Arduino mega	1	5 V	Interruptor termomagnético 3 polos	1	220 V, 16 A
Arduino nano	1	5 V	Interruptor termomagnético 2 polos	1	220 V, 16 A
Shield de borneras para Arduino nano	1	5 V	Clavija trifásica	1	220 V, 30 A
Botones pulsadores	5	5 V			

El manejo del sistema es sencillo e intuitivo, esta acondicionado con botones pulsadores; y dos LCD (pantalla de cristal liquido) para mostrar la información de salida y configuración. El tablero también cuenta con dos partes esenciales para temporizar y controlar la temperatura, como se muestra en Tabla 2. La primera parte tiene la tarea de configurar el tiempo de trabajo mediante los botones, y poner en marcha el temporizador. La pantalla está disponible para mostrar el tiempo de ejecución del deshidratador, como se muestra en la figura 1.

Tabla 2. Tareas de tarjetas de desarrollo.

Arduino nano	Arduino Uno
Mostar mensajes de operación	Obtener temperatura de sensor MAX 6675
Recibir señal de pulsadores	Establecer la temperatura de referencia
Establecer el tiempo de funcionamiento del sistema	Calcular el error
Iniciar el sistema	Calcular la derivada del error
	Ejecutar controlador de temperatura
Finalizar sistema	Enviar la entrada de control
	Mostrar referencia y temperatura del proceso

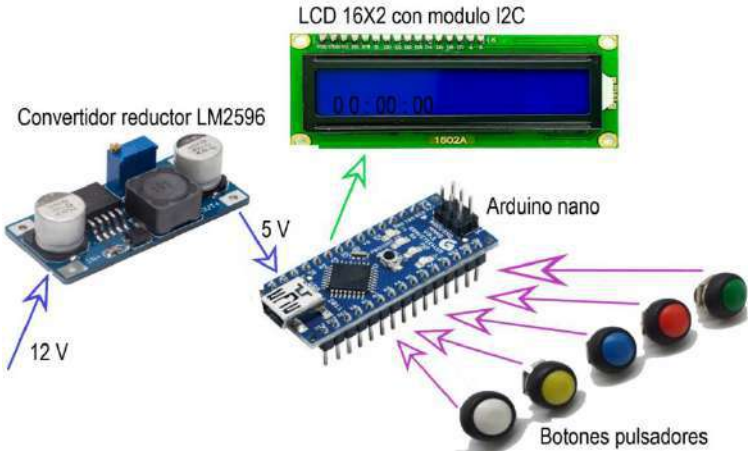


Figura 1. Representación esquemática del sistema temporizador. Gráfico de elaboración propia.

Una segunda etapa se encarga de ejecutar el controlador propuesto que regula la temperatura. El circuito se alimenta con un reductor de voltaje que tiene como entrada 12 V y proporciona en la salida 5 V estables. También se utiliza una protección termomagnética, tanto para las resistencias como para la fuente de alimentación. Un SSR trifásico como etapa de potencia, el cual se activa con voltajes de corriente directa de 5 V. Las resistencias de 1000 W se encuentran conectadas en delta, mientras que para medir la temperatura se cuenta con un módulo MAX6675 con termopar tipo k. La pantalla LCD permite visualizar los valores de temperatura del proceso y la temperatura asignada. Por ultimo, se tiene un encoder para proporcionar la temperatura de referencia o consigna. El diagrama esquemático del sistema de regulación se muestra en la figura 2.

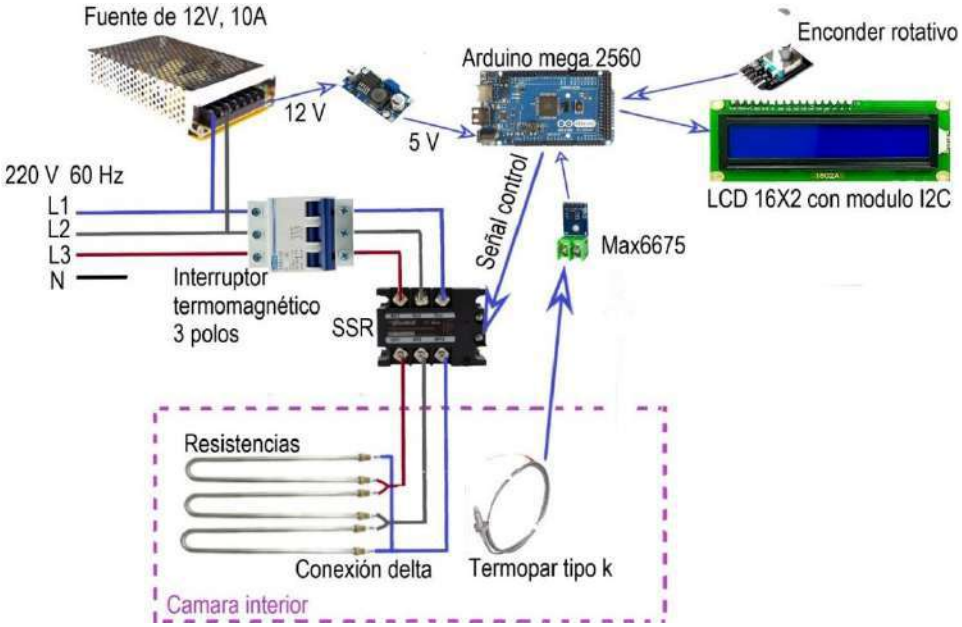


Figura 2. Representación esquemática del sistema físico del deshidratador. Gráfico de elaboración propia.

2.2 Modelado dinámico del deshidratador

Los sistemas térmicos se encuentran en procesos químicos, sistemas de calefacción, refrigeración, aire acondicionado y centrales eléctricas. Estos sistemas se pueden representar de forma

matemática mediante tres mecanismos básicos que son conducción, convección y radiación. Un modelo fiel que represente los fenómenos físicos de un sistema que transmite calor requiere de ecuaciones diferenciales no lineales. Para simplificar el estudio de la planta a controlar, el flujo de calor se asume libremente como descrito por la ley de Fourier. La relación para la transferencia de calor es [6]:

$$Q = \frac{kA}{x}(T_1 - T_2), \tag{1}$$

donde Q es el calor por unidad de tiempo, k es la conductividad térmica, A es el área de la pared, $(T_1 - T_2)$ es la diferencia de temperatura y x es el espesor de la pared.

Los modelos térmicos lineales tienen dos componentes fundamentales denominados resistencia y capacitancia térmica. La resistencia térmica se determina a partir del producto la conductividad térmica y el área de la pared, dividido por el espesor, es decir $R = kA/x$. Por otro lado, la capacitancia térmica es similar a la capacitancia de los circuitos eléctricos y se expresa como:

$$C\frac{dT}{dt} = q_i - q_o, \tag{2}$$

donde C es la capacitancia térmica, q_i es el calor que fluye al interior por la incidencia de una fuente y q_o es el calor que fluye hacia el exterior del objeto. El flujo de calor de entrada q_{in} y el calor a través de las paredes están dados por las siguientes expresiones:

$$q_{in} = Ku, \tag{3}$$

$$q_{rw} = R_r(T_r - T_w), \tag{4}$$

$$q_{w\infty} = R_w(T_w - T_\infty), \tag{5}$$

donde el subíndice r representa el interior del deshidratador, w representa el aislamiento, u es la entrada de control que en consecuencia representa la alimentación eléctrica y K es una constante de ajuste relacionada con la transferencia de calor. La figura 3 muestra un diagrama esquemático del deshidratador.

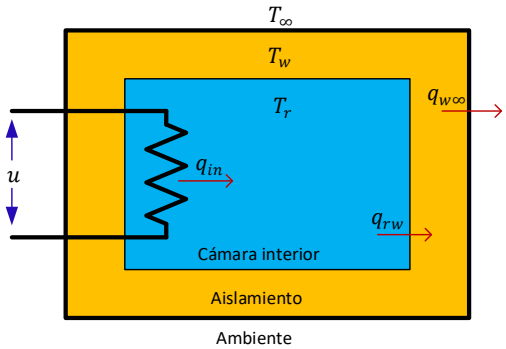


Figura 3. Representación esquemática del deshidratador. Gráfico de elaboración propia.

Las ecuaciones diferenciales que representan al sistema de estudio son:

$$C_r\frac{dT_r}{dt} = -R_rT_r + R_rT_w + Ku, \tag{6}$$

$$C_w\frac{dT_w}{dt} = R_rT_r - (R_r + R_w)T_w + R_wT_\infty. \tag{7}$$

Las ecuaciones (6) y (7) se pueden expresar en espacio de estados como:

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \begin{bmatrix} \dot{T}_r \\ \dot{T}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_r}{C_r} & \frac{R_r}{C_r} \\ \frac{R_r}{C_w} & -\frac{(R_r + R_w)}{C_w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_r \\ T_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K}{C_r} & 0 \\ 0 & \frac{R_w}{C_w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ T_\infty \end{bmatrix}, \tag{8}$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_r \\ T_w \end{bmatrix}. \tag{9}$$

Para obtener la función de transferencia del sistema, se aplica la transformada de Laplace al sistema en espacio de estados (8) y (9); y se obtiene lo siguiente:

$$G(s) = \frac{T_r(s)}{U(s)} = \frac{K[C_w s + (R_r + R_w)]}{C_r C_w s^2 + [C_r(R_r + R_w) + C_w R_r]s + R_r R_w}. \tag{7}$$

Considerando que C_w tiene un valor despreciable, se puede eliminar el cero del numerador y la ecuación (7) se puede expresar como:

$$G(s) = \frac{T_r(s)}{U(s)} = \frac{K_q}{As^2 + Bs + 1}, \tag{8}$$

donde $K_q = \frac{K(R_r+R_w)}{R_r R_w}$, $A = \frac{C_{rw}}{R_r R_w}$, $B = \frac{C_r(R_r+R_w)}{R_r R_w}$ y C_{rw} que representa al producto de las capacitancias.

En la práctica se presenta un retardo de tiempo entre la aplicación de la entrada de control y la respuesta del sistema, debido a factores como la posición de los sensores y la inercia térmica inherente al sistema [7]. Para compensar este retardo se agrega a la ecuación el término θ, por lo tanto, el modelo matemático utilizado para representar al deshidratador es:

$$G(s) = \frac{T_r(s)}{U(s)} = \frac{K_q e^{-\theta s}}{As^2 + Bs + 1}. \tag{9}$$

2.3 Identificación del sistema

Para poder extraer los parámetros del sistema se ingresa a la entrada un escalón con un nivel de potencia definido. Mediante una prueba se mide la temperatura en periodos definidos de 3 segundos. Los valores correspondientes se registran en una base de datos para ser procesados por un software especializado. Los datos de prueba son ingresados al Tolbox System Identification de MATLAB para obtener los parámetros de la función de transferencia.

Las pruebas correspondientes se realizaron de la siguiente manera. En la primera prueba se estableció un valor fijo la entrada de control. Posteriormente se capturaron los datos de temperatura considerando que el sistema se comporta de manera lenta. El escalón de entrada con un cambio del 20% (44 V) de la entrada de control. En la figura 4 se tiene la respuesta del sistema.

Con los datos obtenidos se procede a restar la temperatura del ambiente para saber el cambio obtenido, teniendo como origen el cero, como se muestra en la figura 5.

Para procesar los datos se seleccionó un modelo de proceso, como se aprecia en la figura 6, y se estableció la misma cantidad de polos y ceros, además del retador propuesto en (9). En la figura 7 se muestra el resultado obtenido después de varias iteraciones. En la figura 8 se muestra la función de transferencia obtenida y el porcentaje de similitud conseguido.

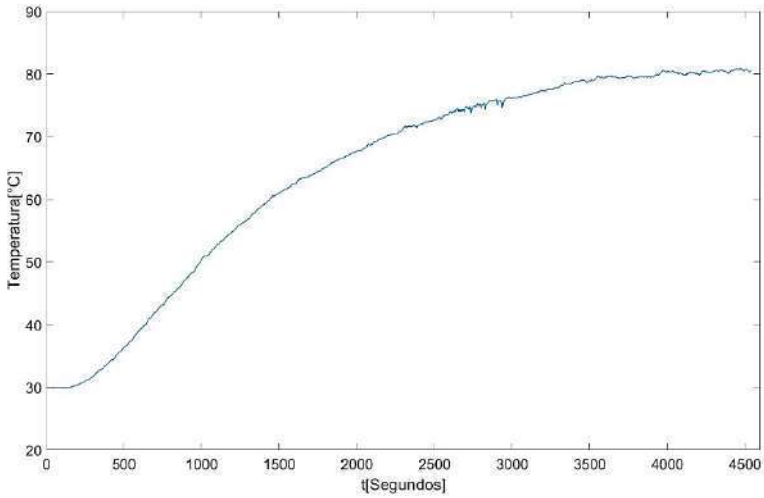


Figura 4. Respuesta a entrada escalón. Gráfico de elaboración propia.

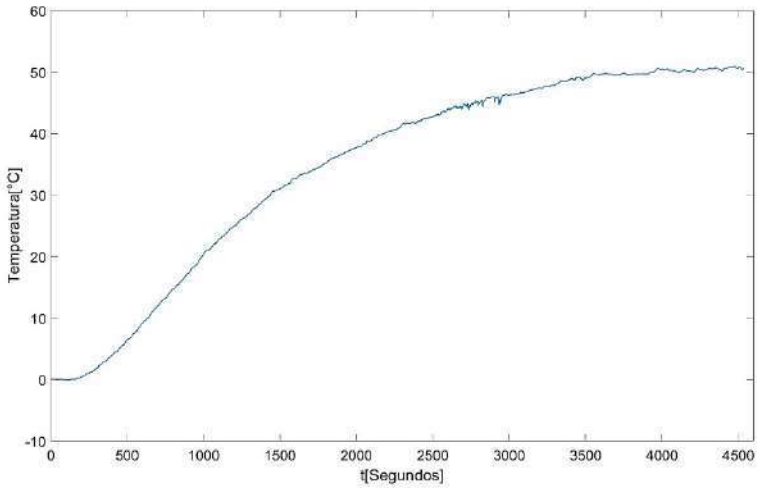


Figura 5. Respuesta a entrada escalón con cambio en el origen. Gráfico de elaboración propia.

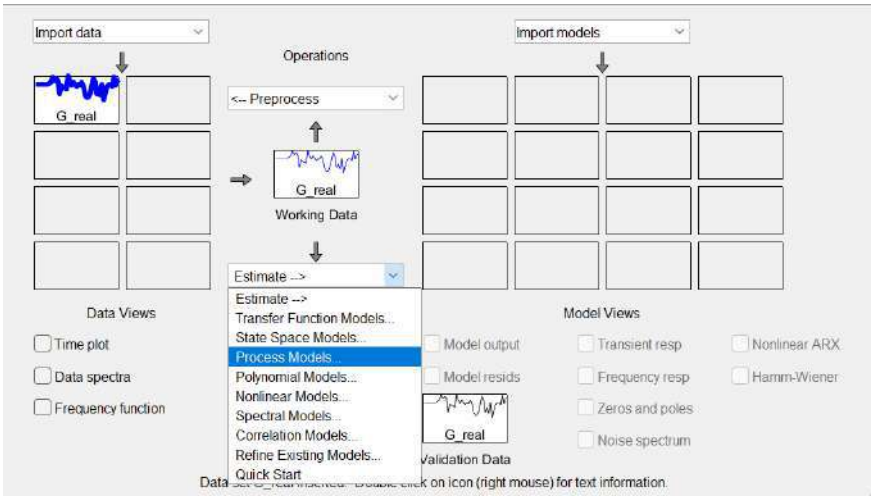


Figura 6. Selección del tipo de sistema a estimar. Gráfico de elaboración propia.

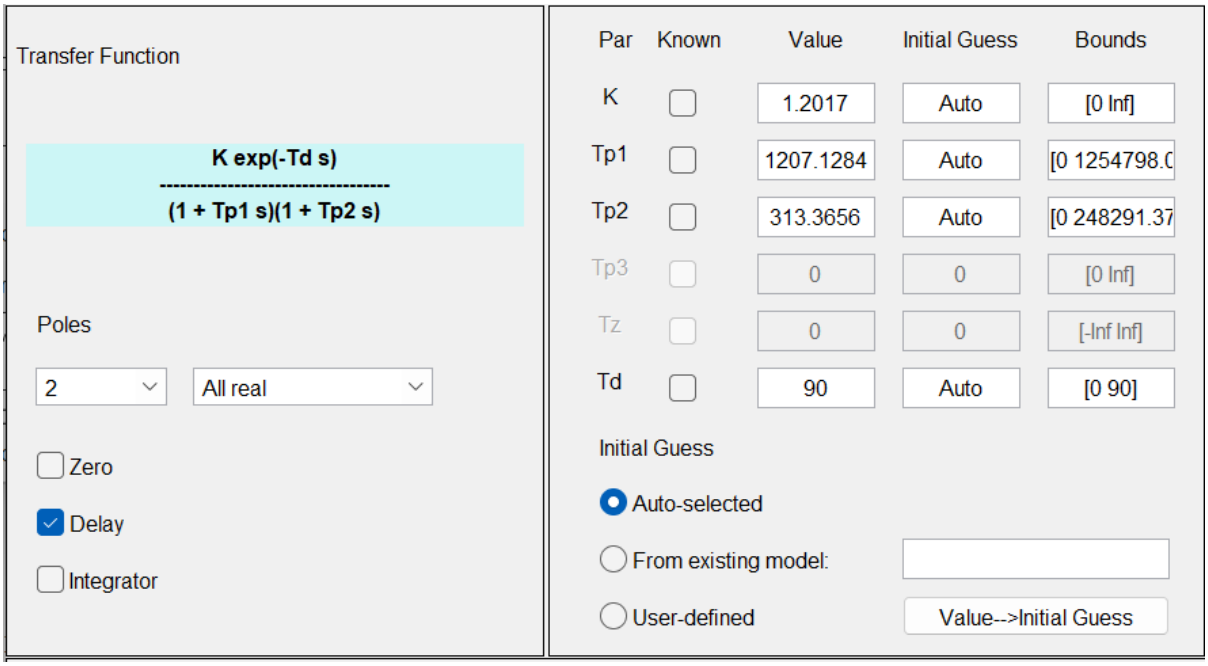


Figura 7. Valores obtenidos y sus cotas. Gráfico de elaboración propia.

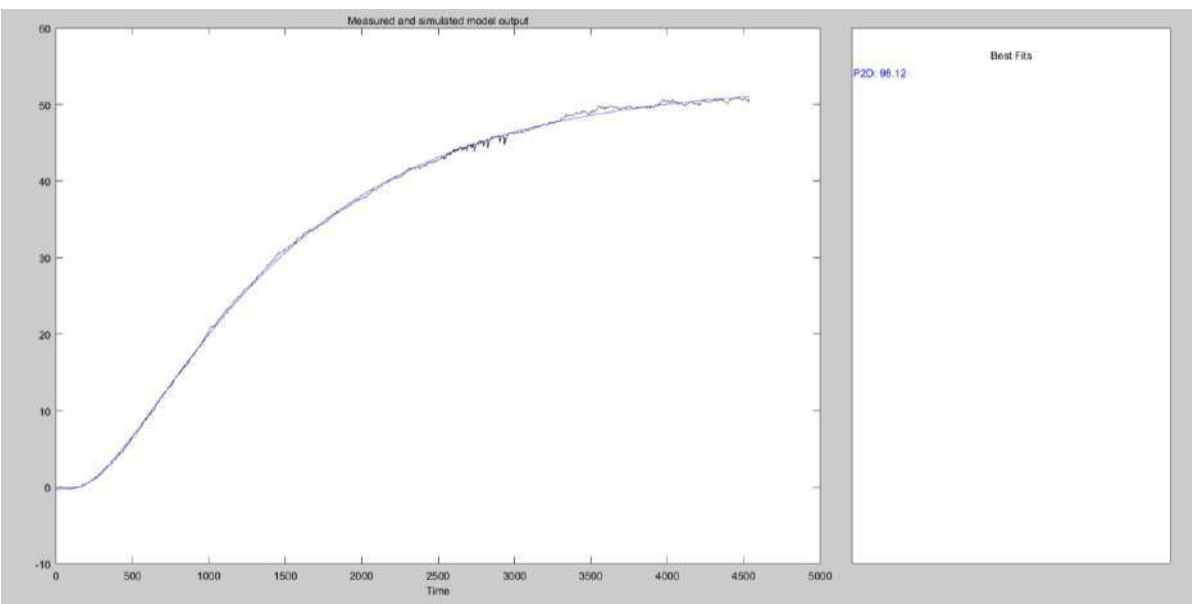


Figura 8. Sistema real comparado con el sistema estimado. Gráfico de elaboración propia.

Los valores obtenidos de la identificación del sistema se expresan en la función de transferencia de la ecuación (10), teniendo una congruencia del 98.12 % respecto a los datos del sistema original. Con esta identificación se pueden probar diferentes controladores en el entorno de simulación.

$$G(s) = \frac{T_r(s)}{U(s)} = \frac{1.2017e^{-90s}}{3.7826\text{x}106s^2 + 1520.47s + 1} \tag{10}$$

2.4 Controlador propuesto

El controlador más utilizado en la industria es el controlador PI (Proporcional-integral), ya que es ampliamente estudiado en la literatura y de fácil implementación. Este controlador se puede escribir de forma matemática como:

$$u = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt, \tag{11}$$

donde $e(t)$ es el error, K_p es la ganancia proporcional y K_i es la ganancia integral. En los procesos industriales es común utilizar métodos heurísticos para sintonizar este tipo de controladores. Sin embargo, existen métodos que se pueden utilizar para generar un conjunto de parámetros dependiendo de la respuesta del sistema [8]. Los métodos propuestos como Ziegler-Nichols garantizan estabilidad, pero no una respuesta dinámica deseada. En la figura 9 se muestra una simulación del sistema identificado en lazo cerrado con dos controladores PI. El primer controlador definido por la línea roja presenta un controlador agresivo, generando oscilaciones en la respuesta del sistema. El segundo controlador definido por la línea azul presenta una respuesta más conservativa, pero el tiempo de asentamiento es prolongado.

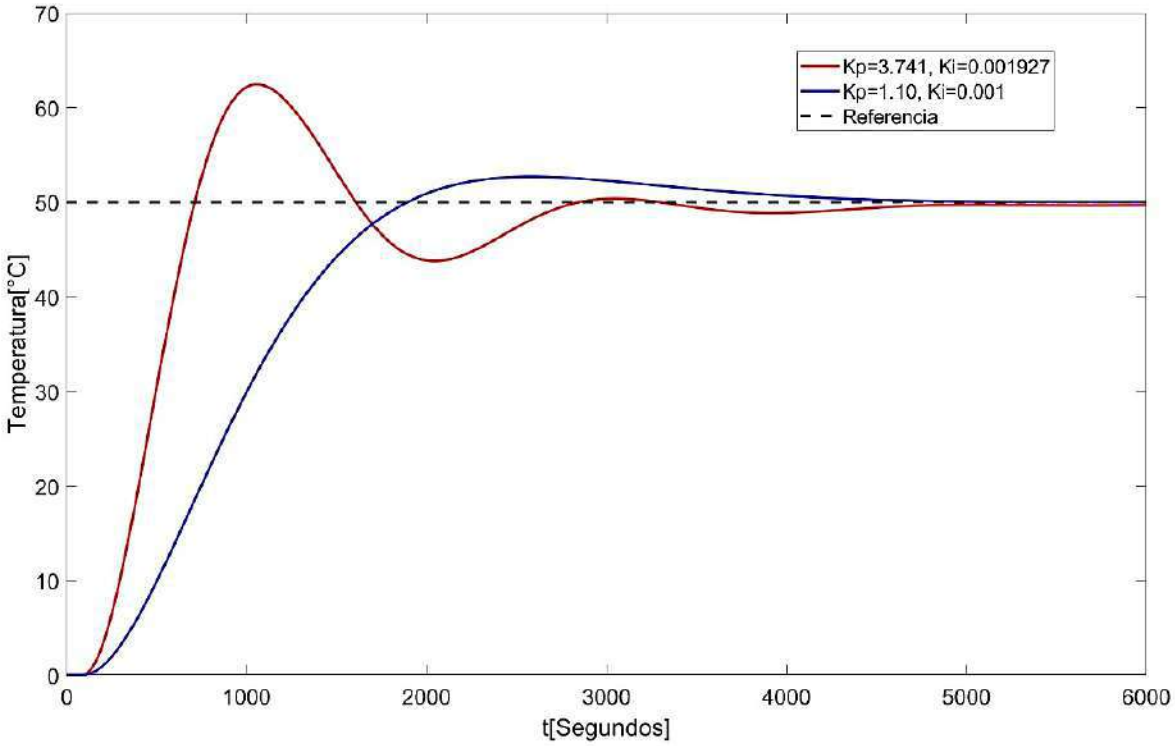


Figura 9. Simulación en lazo cerrado con un controlador PI. Gráfico de elaboración propia.

En este trabajo se propone utilizar un mecanismo de adaptación difuso para cambiar las ganancias del controlador. El objetivo del controlador con ganancias adaptables es mejorar la respuesta en un amplio rango de referencias. Con esta estrategia de control se pretende tener una respuesta más suave, además de un tiempo de asentamiento más corto. El método propuesto se basa en la suposición de que un error elevado necesita una acción de control agresiva. A medida que el error se va reduciendo la acción de control debe hacerse más conservativa para contrarrestar las oscilaciones y el sobreimpulso. El esquema de control propuesto con la planta se puede ver en la figura 10.

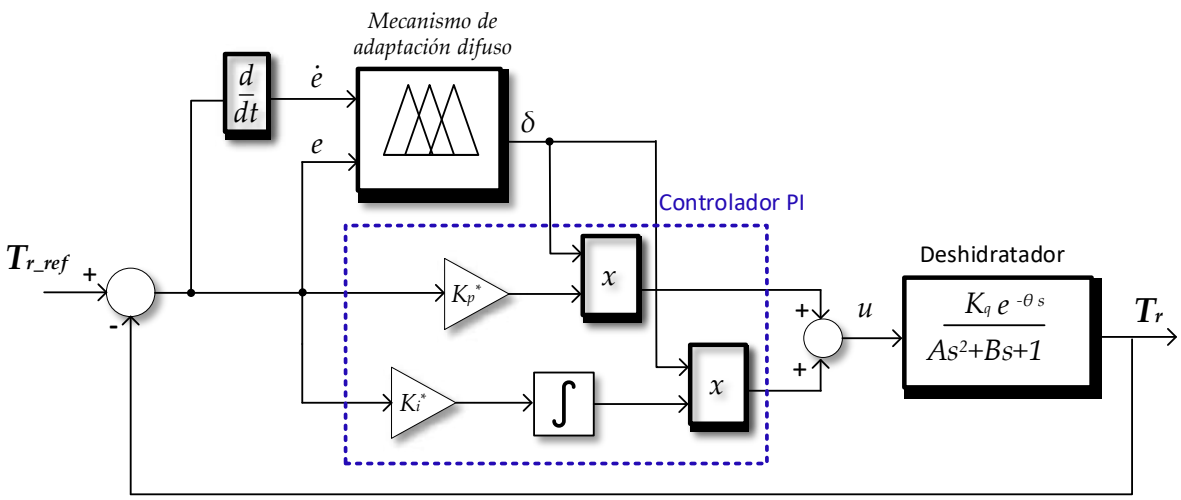


Figura 10. Esquema del controlador propuesto. Gráfico de elaboración propia.

Matemáticamente las ganancias del controlador se pueden escribir como:

$$K_p{}^* = \delta K_p, \tag{12}$$

$$K_i{}^* = \delta K_i, \tag{13}$$

donde $K_p{}^*$ es la ganancia proporcional adaptada, $K_i{}^*$ es la ganancia integral adaptada y δ es la salida del sistema de adaptación difuso. Al considerar las ganancias adaptadas, se puede reescribir (11) como:

$$u = K_p{}^* e(t) + K_i{}^* \int_0^t e(\tau) d\tau. \tag{14}$$

Las variables de entrada para el mecanismo de adaptación difuso son el error y la derivada del error. El universo de discurso para el error es de -120 a 120 °C. En el caso del universo de discurso para la derivada del error es de -0.15 a 0.15 °C/s. La salida se define por el parámetro de adaptación δ que tiene un rango de 0 a 1. Las variables lingüísticas utilizadas para las entradas y la salida son NG (Negativo Grande), NM (Negativo Mediano), NP (Negativo pequeño), Z (Zero), PP (Positivo Pequeño), PM (Positivo Mediano) y PG (Positivo Grande). Las funciones de membresía se pueden observar en las figuras 11, 12 y 13.

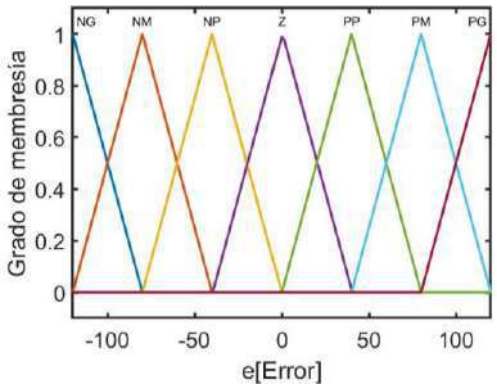


Figura 11. Funciones de membresía para el error. Gráfico de elaboración propia.

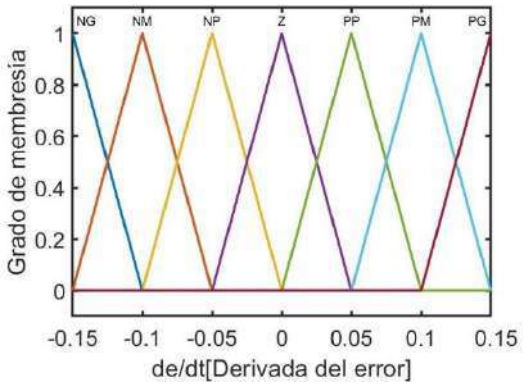


Figura 12. Funciones de membresía para la derivada del error. Gráfico de elaboración propia.

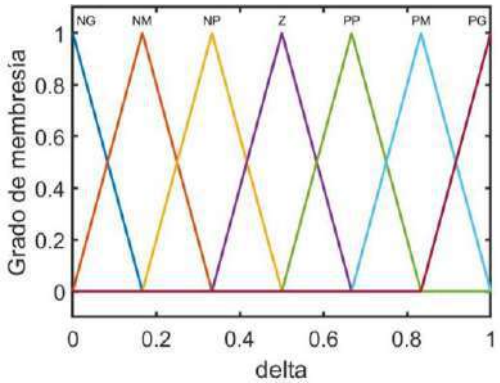


Figura 13. Funciones de membresía para la salida delta. Gráfico de elaboración propia.

Las reglas base se muestran en la tabla 3. Debido a que se tienen dos entradas se cuenta con un total de 49 reglas. La defusificación utiliza el método de centro de gravedad (COG, por sus siglas en inglés) [9]. El método COG se escribe matemáticamente en la ecuación (15).

$$Z = \frac{\int \mu(z) z dz}{\int \mu(z) dz}, \tag{15}$$

donde $\mu(z)$ es la amplitud de la función de membresía, z representa la salida difusa y Z representa a la salida certera (crisp). Mediante el Fuzzy Logic Toolbox de MATLAB se implementaron las reglas base para obtener una representación gráfica, como se muestra en la figura 14. Para una mejor comprensión del funcionamiento del esquema propuesto, se simulo la planta identificada con el PI adaptable difuso. En la figura 15 se muestran los tres controladores, por ello, se puede ver que la respuesta del controlador propuesto presenta las ventajas de ambos controladores, pero sin oscilaciones ni tiempos prolongados de asentamiento.

Tabla 3. Reglas base para el mecanismo de adaptación difuso.

	NG	**NM**	**NP**	**Z**	**PP**	**PM**	**PG**
NG	NG	NG	NM	NM	NP	NP	Z
NM	NG	NM	NM	NM	NP	Z	PP
NP	NM	NM	NP	NP	Z	PP	PP
Z	NM	NM	NP	Z	PP	PM	PM
PP	NP	NP	Z	PP	PM	PM	PG
PM	NP	Z	PP	PP	PM	PG	PG
PG	Z	PP	PP	PM	PM	PG	PG

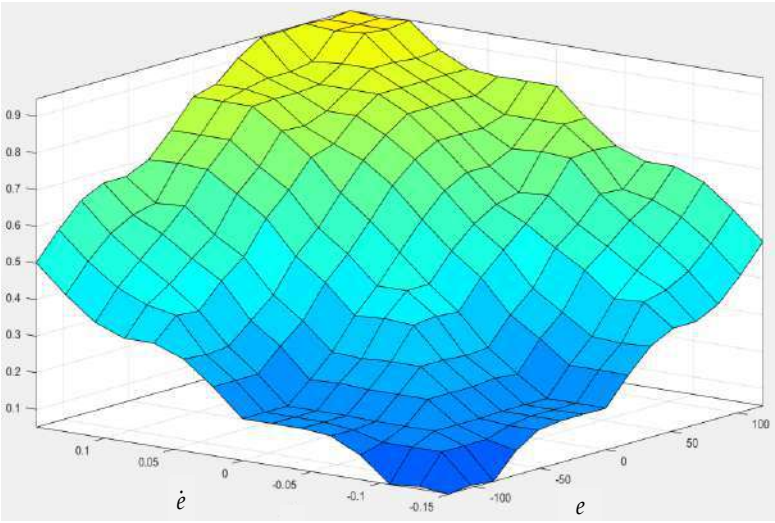


Figura 14. Representación gráfica de las reglas difusas, variables de entrada y salida δ. Gráfico de elaboración propia.

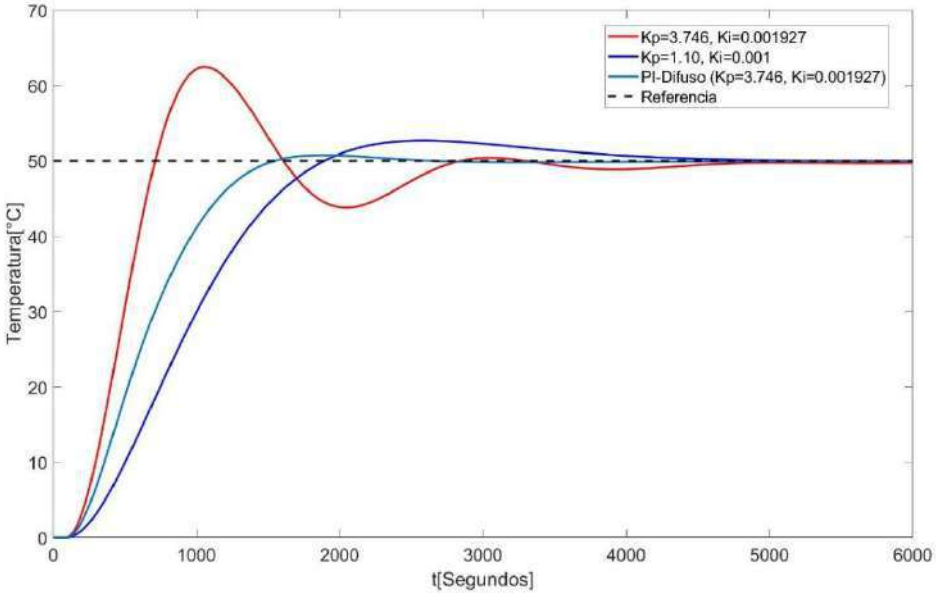


Figura 15. Simulación en lazo cerrado del controlador PI adaptable difuso. Gráfico de elaboración propia.

3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados de las pruebas de controlador propuesto. En la figura 16 se tiene una ilustración del prototipo utilizado. En la figura 17 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control de temperatura en lazo cerrado. El PI adaptable difuso se implementó en un Arduino mega 2560 que ejecuta los cálculos del controlador teniendo como entradas iniciales la referencia y la temperatura ambiente. El muestreo de la variable se realiza cada segundo usando el modulo MAX6675. La entrada de control se envía por medio de una modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés). El PWM se encarga de conmutar un SSR para manipular el voltaje de alimentación de las resistencias conectadas en delta.

Figura 16. Horno deshidratador. Fotografía de elaboración propia.

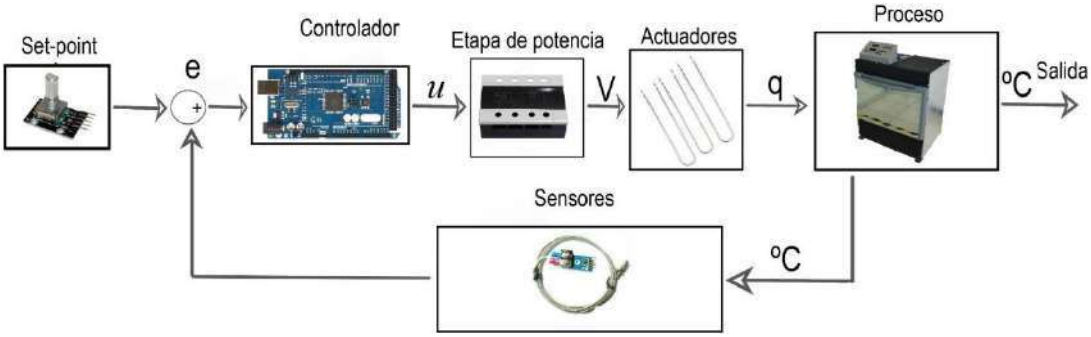


Figura 17. Diagrama de bloques del sistema de control. Gráfico de elaboración propia.

En la figura 18 se observa el comportamiento del sistema ante distintos valores de las ganancias de control. La línea de color rojo corresponde al controlador PI clásico con K_p=3.741 y K_i=0.001927. Se observó un incremento rápido de la temperatura con un tiempo de subida de 500 segundos. Sin embargo, este controlador presenta oscilaciones con un sobreimpulso del 10% y un subimpulso del 5%.

La siguiente línea de color azul corresponde al controlador PI clásico con K_p=1.10 y K_i=0.001. Se observó un aumento lento de temperatura con un tiempo de subida de 1500 segundos, además de un sobreimpulso del 10%. En esta prueba el sistema alcanzó la estabilidad a los 4500 segundos. Por ultimo, la línea azul corresponde al controlador PI adaptable difuso con K_p=3.741 y K_i=0.001927. Se observó un aumento de temperatura que no presenta oscilaciones. El comportamiento es asintótico con un tiempo de estabilización de 2500 segundos. El controlador propuesto obtuvo una curva suave cerca de la referencia y con tiempo de estabilización menor a las pruebas de los otros dos controladores PI.

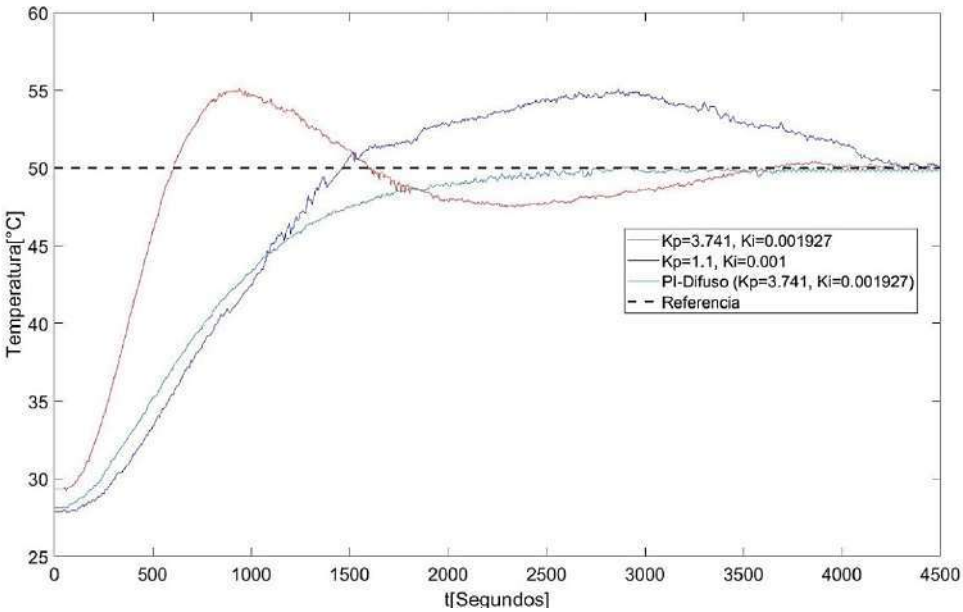


Figura 18. Resultados en lazo cerrado del controlador PI adaptable difuso vs PI clásico. Gráfico de elaboración propia.

En la figura 19 se exponen los resultados de deshidratación de zanahoria realizados por el horno con el controlador PI adaptable difuso.

Figura 19. Resultados de la deshidratación de zanahoria. Gráfico de elaboración propia.

4. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un PI adaptable difuso con el propósito de mejorar el comportamiento del sistema. Para que el deshidratador se comporte de una manera confiable. Los resultados de las pruebas experimentales en la figura 18 muestran el comportamiento del sistema en un proceso de deshidratación de alimentos, comparando las respuestas del PI clásico con el PI adaptable difuso. Resaltando la respuesta rápida y sin variaciones en estado estable para el PI adaptable difuso, muy similar a las respuestas simuladas que se encuentran en figura 14. Obteniendo una mejora en el sistema cumpliendo con los objetivos planteados. La reducción en el tiempo de estabilización para este tipo de deshidratador supone un periodo más corto en el proceso. El controlador propuesto se implemento en un Arduino Mega 2560. Con las prestaciones encontradas durante el desarrollo de este trabajo se plantea hacer pruebas y ajustes para que este mismo controlador desarrollado se pueda implementar en sistemas térmicos con temperaturas requeridas para horneado.

Referencias

[1] Bravo D.A., Acuña W. and Pito J.C. .Prototipo para el control de temperatura y humedad en el secado Mecánico del Café. Ingeniería y Desarrollo. Universidad del Nortel. Vol. 40, No. 1, 2145-9371, 2022.

[2] Marquez A.C. et al. Sistema de control PID Sintonizado Por Algoritmo de Evolución diferencial. La Mecatrónica en México. Vol. 10, No. 2, páginas 47 – 60, 2020.

[3] Almazan-Arvizu R.Y. et al. Control Pi Difuso de un sistema de Levitación Magnética Mediante UN Sistema Embebido. Ingeniería. Investigación y Tecnología. Vol. 20, No. 4, 1-11, 2019.

[4] Ishak N. et al. PID studies on position tracking control of an electro-hydraulic actuator. International Journal of Control Science and Engineering. Vol. 2, No. 5, 120-126, 2012.

[5] Ranjan , M.S. et al. Adaptive fuzzy pi controller design for Coupled Tank System: an experimental validation. IFAC Proceedings Volumes. Vol. 47, No. 1, 878-881, 2013.

[6] Balcazar, R. et al. The Regulation of an Electric Oven and an Inverted Pendulum Symmetry. MDPI. Vol 14, No. 4, 759, 2022.

[7] Pekař, L. (2020). Modeling and identification of a time delay heat exchanger plant. Advanced Analysis and Control Techniques for Thermal Systems with Heat Exchangers. In Elsevier eBooks, 23–48, 2020.

[8] K. Ogata, Ingeniería de control moderna, Madrid: Prentice Hall, 2010.

[9] Bai, Y. and Wang, D. Fundamentals of Fuzzy Logic Control - fuzzy sets, fuzzy rules and defuzzifications Technologies in Industrial Applications. Advances in Industrial Control. Springer, London. 17–36, 2006.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 226 - 245
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023.

Mapa interactivo para la localización de los espacios de la UPIIZ

Arredondo Morales Efraín, López Cazares Ana Paulina
y Gonzalez Gallegos Miguel Angel

Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas
earredondo@ipn.mx

Resumen

En este artículo, presentamos el desarrollo del proyecto titulado "Mapa interactivo para la localización de los espacios de la UPIIZ", una herramienta diseñada para enriquecer la experiencia dentro de una institución al proporcionar información sobre la ubicación de diversos espacios, tanto internos como externos. Hemos utilizado una variedad de tecnologías tanto parala implementación de la herramienta como para la creación de modelos tridimensionales de la institución. Nuestra solución permite la navegación en tiempo real, ofreciendo a los usuarios la capacidad de definir puntos de inicio y destino, junto con una experiencia de simulación en 3D. Además, aseguramos la disponibilidad y accesibilidad de la información mediante el uso de un sistema de almacenamiento en tiempo real, funcionando tanto en dispositivos móviles como en ordenadores de escritorio. Para validar la eficacia de la herramienta, recopilamos y presentamoslos resultados obtenidos de alumnos, tanto de nuevo ingreso como de grados superiores, que utilizaron la aplicación, con un alto nivel de satisfacción y mejoras en la navegación dentro de la institución. Basándonos en un enfoque de diseño centrado en el usuario, nuestro proyecto proporciona una solución efectiva para mejorar la adaptación y la navegación dentro de instituciones educativas.

Palabras Clave: GPS, UPIIZ, Unity, Blender, espacios externos, espacios internos, simulación 3D,

1. Introducción

En la era actual, la tecnología abre un abanico de oportunidades para concebir soluciones innovadoras que revolucionan nuestra vida cotidiana. En este contexto, la Universidad Profesional Interdisciplinaria de Ingenierías campus Zacatecas (UPIIZ) ha emprendido el siguiente proyecto: el desarrollo de una interfaz que simula un sistema de GPS, otorgando a los estudiantes la capacidad de localizar de manera eficiente tanto áreas internas como externas dentro de la institución. Esta iniciativa surge como respuesta a una problemática recurrente que aqueja a los alumnos al intentar ubicar lugares específicos en la UPIIZ, tales como cubículos de profesores o áreas administrativas.

Este artículo presenta el proyecto "*Mapa interactivo para la localización de los espacios de la UPIIZ*", una solución innovadora desarrollada por la UPIIZ para abordar estos desafíos de orientación y localización en espacios internos. A lo largo del artículo, explicaremos en detalle el desarrollo y la implementación de esta herramienta, así como los resultados obtenidos a través de la experiencia de los alumnos y reflexiones críticas sobre su impacto en la institución.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 226 - 245
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023.

2. Metodología

Para el desarrollo del proyecto se basó en la metodología de cascada, esta metodología sigue un orden riguroso en el desarrollo del software. La cual indica que los resultados son se verán hasta el final del desarrollo, en esta metodología el desarrollo y el cliente no tiene mucho contacto como podría ser con las metodologías agiles.[1]

La metodología en cascada, según Sommerville, sugiere que si surge un error en la fase que se esté trabajando se tiene que terminar todas las fases para poder regresar a la fase donde se reportó el error y realizar los cambios pertinentes. En la figura N° 1 se puede ver la metodología.

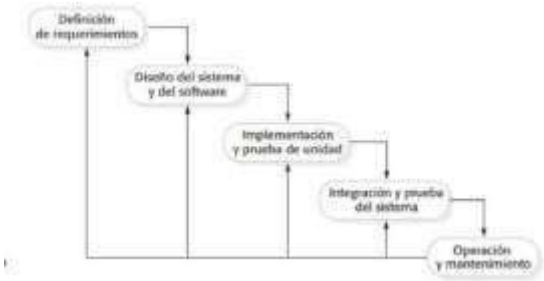


Figura 1. El modelo cascada según Sommerville que se utilizó en el proyecto.

Por otro lado, según Barrera, la metodología en cascada permite regresar a fases anteriores para realizar cambios pertinentes, continuando con las fases siguientes y corrigiendo cada una de ellas hasta llegar a la fase en la que se encontraba, para luego continuar con el proyecto. Esta metodología se divide en 5 fases, como se muestra en la Tabla 1.[2]

Tabla 1. Fase en cascada para el desarrollo del proyecto Mapa interactivo para la localización de los espacios en la UPIIZ.

Fases	Descripción
Análisis y definición de requerimientos	Con ayuda del cliente se definen los servicios, restricciones y metas del proyecto.
Diseño	Se hacen los diseños con base a los requerimientos, ya sea de arquitectura de datos, interfaz, entre otras.
Implementación	Se programa con base a los diseños planteadosdando revisiones constantes para analizar si cumplen con lo solicitado.
Pruebas	Se prueba el sistema completo para asegurar que se cumplen los requerimientos.
Mantenimiento	Se elaboran los manuales con base al funcionamiento del proyecto, se buscan posibles errores que no se hayan contemplado

A continuación, y en base a las fases antes mencionadas y siguiendo la metodología, se describe el desarrollo realizado en cada una de las fases.

2.1 Análisis y diseño de requerimientos

Se realizaron estudios para determinar las posibles metodologías a utilizar, y se optó por la metodología en cascada. También se llevó a cabo el análisis y levantamiento de requerimientos con el propósito de mostrar de manera clara y comprensible las características del proyecto.

Además, se elaboraron dos diagramas de bloques, uno dirigido a la aplicación móvil y otro a la aplicaciónde escritorio.

2.1.1 Diagrama de bloques

El diagrama de bloques representa el flujo del proceso, y cada bloque representa una fase del proyecto al representar visualmente los componentes de las plataformas móvil y de escritorio, respectivamente.[3]

En la figura N° 2 se muestran los bloques y sus componentes, lo que permite analizar el comportamiento de la herramienta que se diseñó. Los bloques identificados son:

- Bloque de Menú Inicio: Muestra los elementos que lo componen y que te ayudan a interactuar y conectar con los otros tres bloques.

- Bloque de bases de datos: Establece conexiones y comunicaciones con bases de datos y maneja solicitudes de información necesaria.

- Bloques de mapas: representan mapas que los usuarios pueden ver, incluidos mapas 2D y 3D para simulación.

- Bloque "Proceso Interno": Este bloque realiza cálculos internos. B. Calcular el recorrido entre puntos y el tiempo estimado que le tomaría a una persona caminar.

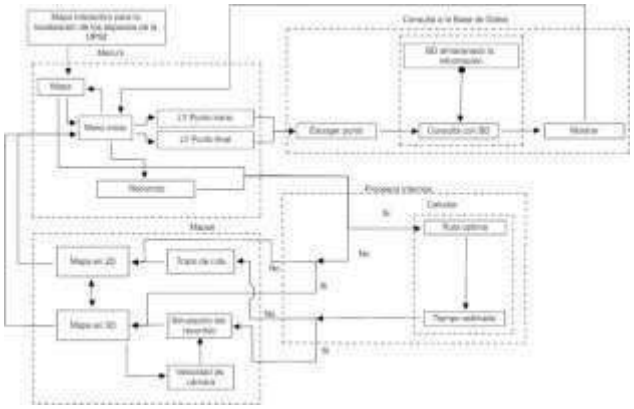


Figura 2. Diagrama de bloques del funcionamiento general de la aplicación, representa los 4 bloques que conforman el sistema.

El diagrama de bloques de la figura N° 3 muestra cómo funciona la aplicación de escritorio y está dividido en dos bloques principales.

- Bloque de base de datos: Aquí es donde se establece la conexión a la base de datos para consultar y actualizar la información de los elementos.

- Bloque general: Este bloque contiene la interacción del usuario con la escena que constituye la herramienta.

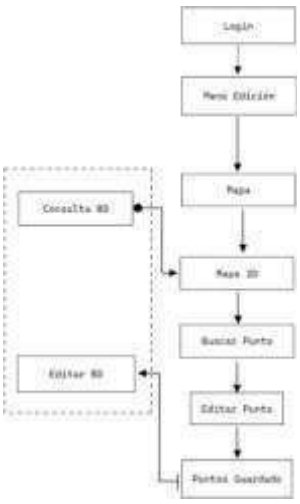


Figura 3. Diagrama de bloques del funcionamiento de la aplicación de escritorio en el apartado del administrador.

2.1.2 Requerimientos

Para el proyecto se obtuvieron los siguientes requerimientos presentados en la tabla 2. Se cuenta con 12 requerimientos funcionales y 2 requerimientos no funcionales.

Tabla 2. Requerimientos que se utilizador para el desarrollo del proyecto Mapa interactivo para la localización de los espacios en la UPIIZ

ID	Requerimientos	
	Nombre	Funcional
R-01	Modelar mapa de la UPIIZ en 2D	RF
R-02	Modelar mapa de la UPIIZ en 3D	RF
R-03	Identificar edificios	RF
R-04	Mostrar áreas internas de los edificios	RF
R-05	Identificar áreas internas de los edificios	RF
R-06	Intercambiar entre vista 2D y 3D	RF
R-07	Colocar punto origen y destino	RF
R-08	Trazar de ruta a seguir	RF
R-09	Calcular duración del recorrido	RF
R-10	Modificación de datos	RF
R-11	Iniciar sesión	RF
R-12	Simular recorrido	RF
R-13	Descargar mediante QR	RNF
R-14	Modificar velocidad del recorrido en la simulación	RNF

2.2 Diseño

En esta fase, se hizo el diseño de los diferentes diagramas que constituyen el proyecto. Estos diagramas sirvieron como guía al momento de desarrollar las otras fases del modelo.

2.2.1 Diseño de arquitectura

El diseño de arquitectura consiste en 3 niveles como se puede visualizar en la figura N° 4, a continuación, se explica cada nivel.

Nivel de Presentación: En este nivel, se definen los dos modos de interacción con el producto terminado, es decir, la aplicación móvil y la aplicación de escritorio. Aquí se especificarán los elementos visuales, las interfaces de usuario y las interacciones que los usuarios tendrán con el sistema en cada modo.

Nivel de Aplicación: En este nivel, se visualizarán los componentes que conforman el producto final. Esto puede incluir módulos, servicios, funciones y cualquier otra parte del sistema que sea necesaria para su funcionamiento. El diseño de este nivel debe mostrar cómo se estructuran y organizan estos componentes, y cómo interactúan entre sí para cumplir con los requerimientos funcionales del proyecto.

Nivel de Datos: En este nivel, se define cómo se almacenará la información del sistema.

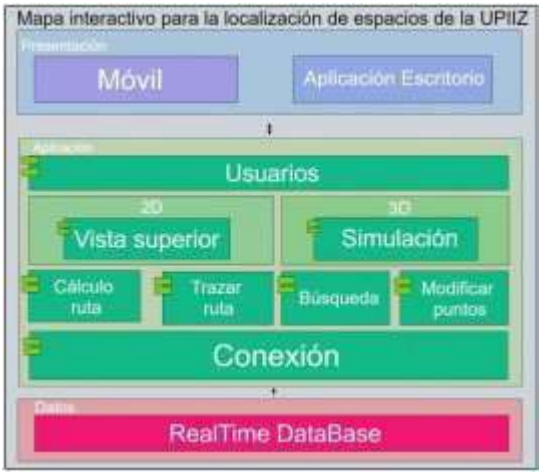


Figura 4. Diagrama de la arquitectura de 3 niveles utilizado para el proyecto.

2.2.2 Diseño de clases

Se crearon un total de 17 clases, cada una de las cuales representa un objeto o entidad en el sistema y describe sus propiedades y comportamientos [5],[6]. En las figuras N° 5 a N° 8 se presentan visualmente estas 17 clases, proporcionando una representación gráfica de la programación utilizada en cada escena del programa.

Figura 5. Diagrama de clases utilizado para programar la escena del menú de búsqueda.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 226 - 245
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023.

Figura 6. Diagrama de clases utilizado para programar la escena del mapa 3d y la simulación del recorrido.

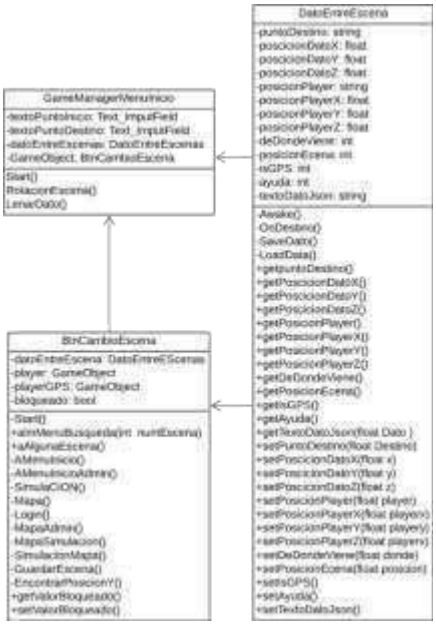


Figura 7. Diagrama de clases utilizado para programar la escena menú de inicio

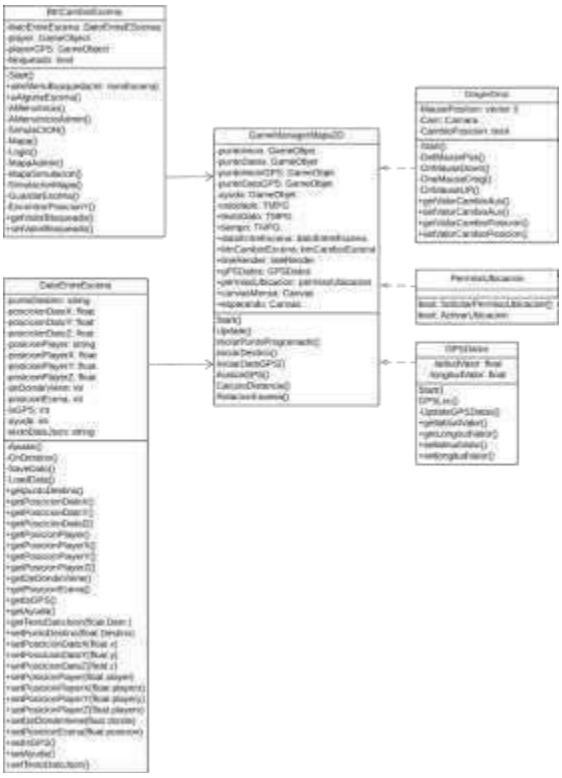


Figura 8. Clases utilizadas para programar la escena del mapa 2D

2.2.3 Diseño de despliegue

El diagrama de despliegue se divide en tres apartados relacionados con los usuarios, el administrador y la base de datos. A continuación, se describen cada uno de estos apartados [7].

Apartado de Usuario: Este apartado indica los requisitos necesarios para utilizar la herramienta desde el punto de vista del usuario. Se necesita un dispositivo móvil con el sistema operativo Android para acceder a la aplicación. Esto implica que los usuarios podrán interactuar con la herramienta a través de sus dispositivos móviles compatibles con Android.

Apartado del Administrador: En este apartado se establecen los requisitos para que el administrador pueda ejecutar la herramienta. Es necesario una computadora con el sistema operativo Windows. Esto implica que el administrador utilizará la herramienta a través de una computadora con Windows para realizar tareas específicas relacionadas con la administración y gestión del sistema.

Apartado de la Base de Datos: Este apartado representa la conexión entre los dos apartados anteriores y se refiere a la base de datos que almacena la información de los espacios. Se requiere conexión a internet y acceso a un navegador para utilizar esta base de datos. Además, la base de datos se implementa utilizando el servicio Firebase y específicamente el servicio de tiempo real (Realtime Database). Esto implica que la herramienta se conectará a Firebase para acceder y almacenar la información relacionada con los espacios.

El diagrama de implementación se divide en tres secciones relacionadas con usuarios, administradores y bases de datos. Cada una de estas secciones se describe a continuación [8].

Sección Usuario: Esta sección especifica los requisitos necesarios para utilizar la herramienta desde el punto de vista del usuario. Se requiere un dispositivo móvil con sistema operativo Android para acceder a la aplicación. Esto significa que los usuarios pueden operar la herramienta a través de cualquier dispositivo móvil compatible con Android.

Sección Administrador: Esta sección define los requisitos que debe cumplir un administrador para poder ejecutar la herramienta. Se requiere una computadora con sistema operativo Windows. Esto significa que los administradores utilizan herramientas a través de sus computadoras con Windows para realizar ciertas tareas relacionadas con la administración y administración del sistema.

Sección de Base de Datos: Esta sección representa la conexión entre las dos secciones anteriores y se relaciona con la base de datos que almacena la información de la habitación. Se requiere una conexión a Internet y acceso al navegador para utilizar esta base de datos. Además, la base de datos se implementa utilizando los servicios de Firebase, específicamente Realtime Database. Esto significa que la herramienta se conectará a Firebase para acceder y almacenar información sobre su área.

En la figura N° 9 se ilustra el diagrama de despliegue.

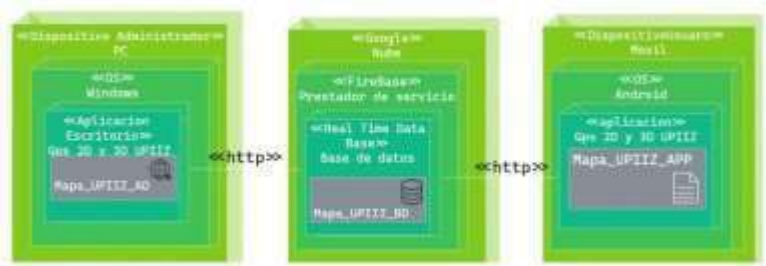


Figura 9. Diagrama de despliegue de los 3 apartados que conforman la aplicación.

2.2.4 Diagrama de actividades

Se elaboró un diagrama de actividades para la versión de escritorio del apartado del administrador. Se divide en 3:

En el apartado de usuario se encuentra la interfaz de las diferentes escenas, donde el usuario interactúa con la aplicación de escritorio. Aquí se pueden visualizar y acceder a las distintas funcionalidades y opciones disponibles.

En el apartado del sistema, se llevan a cabo las actividades relacionadas con la modificación de la información de los espacios. Esto implica crear nuevos espacios, realizar modificaciones en espacios existentes o eliminar espacios según sea necesario. Estas acciones se realizan mediante la interacción con la interfaz y la ejecución de procesos internos en el sistema.

En el apartado de la base de datos, se realizan solicitudes de información y actualizaciones en la base de datos. Esto implica consultar y recuperar datos relevantes para mostrar en la interfaz, así como realizar actualizaciones y modificaciones en la base de datos cuando se crean, modifican o eliminan espacios. Estas operaciones garantizan la integridad y actualización de la información almacenada en la base de datos, como se muestra en la figura N° 10.

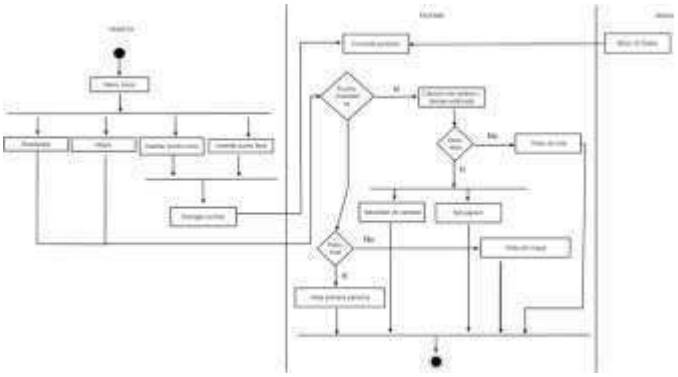


Figura 10. Diagrama actividades: Actividades y relación que tiene el usuario administrador, el sistema y la base de datos

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 226 - 245
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023.

2.2.5 Diagrama de casos de uso

Un diagrama de casos de uso es una representación gráfica que muestra las interacciones entre actores y sistemas a través de diferentes casos de uso. En este caso, el diagrama de casos de uso de la herramienta muestra un total de 18 casos de uso que describen diferentes acciones que un usuario puede realizar y cómo interactúa con el sistema [9].

Cada caso de uso representa una característica específica de la herramienta y describe una secuencia de pasos tomados para lograr un objetivo específico. Estos casos de uso le ayudarán a comprender cómo funcionan las herramientas y qué acciones puede realizar.

Con base en un total de 18 casos de uso en el diagrama, podemos inferir que esta herramienta ofrece una amplia gama de características y posibilidades para los usuarios. Cada caso de uso puede representar una tarea, operación o interacción específica que un usuario puede realizar dentro del sistema.

Los diagramas de casos de uso son herramientas útiles para visualizar y comprender la estructura y el flujo de trabajo de las herramientas, así como para identificar interacciones entre usuarios y sistemas. Esto proporciona una base sólida para el diseño y desarrollo de herramientas, lo que ayuda a garantizar que se cumplan las necesidades del usuario y los objetivos previstos. El diagrama se puede ver en la figura N° 11.

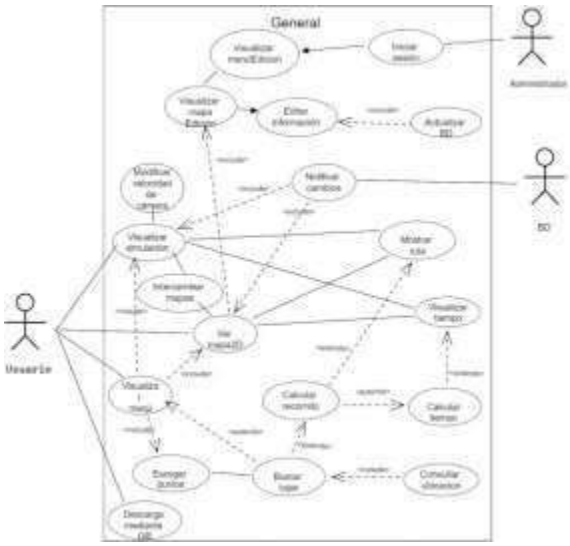


Figura 11. Diagrama Casos: Relación con los 3 actores de la aplicación y sus casos de uso

2.2.6 Diagrama de base de datos

La base de datos utilizada en este proyecto es no relacional. Es decir, se basa en almacenar y recuperar información en colecciones en lugar de tablas relacionales como las bases de datos relacionales tradicionales. En este caso, la base de datos no relacional se organiza en colecciones, cada una de las cuales contiene información relacionada y se almacena por separado. Figura N° 12 [10].

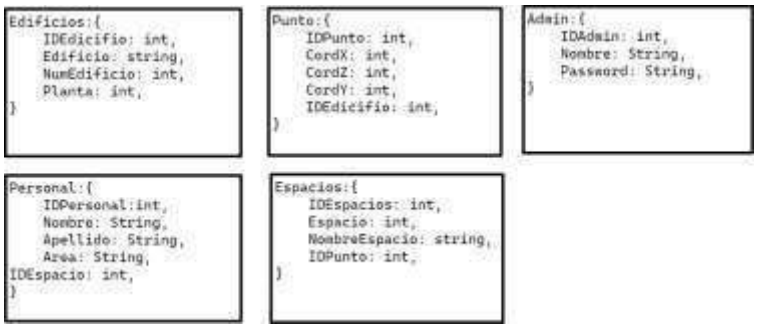


Figura 12. Diagrama base de datos: Colecciones para el guardado de puntos y credenciales para el usuario administrador.

2.2.7 Prototipos

El diseño de la interfaz de usuario móvil creó cuatro escenas que permiten a los usuarios ver e interactuar con información sobre rutas y tiempos de viaje estimados entre dos puntos seleccionados. Estas escenas están diseñadas para ser intuitivas y fáciles de usar para facilitar la navegación y la comprensión de la información [11]. El flujo entre las escenas se puede ver en la figura N° 13.

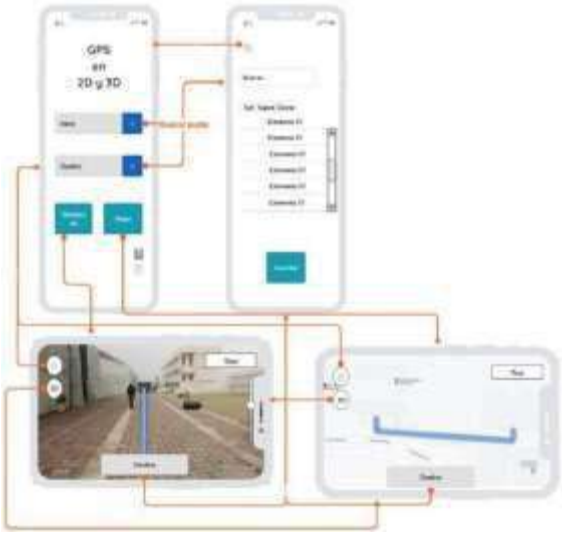


Figura 13. Diagrama de la interfaz móvil: flujo y conexión entre las escenas de la aplicación Mapa interactivo para la localización de los espacios en la UPIIZ

La interfaz de escritorio consta de las 4 escenas presentes en la versión móvil, además de otras 4 escenas adicionales destinadas al usuario administrador. Al iniciar sesión, el administrador tendrá acceso a un mapa específico donde podrá agregar, modificar o eliminar puntos según sea necesario. Estas funciones adicionales permiten al administrador tener un mayor control y gestión de los puntos presentes en la herramienta. El fujo entre las pantallas se puede ver en la figura N° 14.

Figura 14. Diagrama de la interfaz de escritorio: flujo y conexión entre las diferentes escenas de la aplicación Mapa interactivo para la localización de los espacios en la UPIIZ

2.3 Implementación

En esta fase se realizaron diversas tareas relacionadas con el modelado y la implementación del proyecto.

Modelado en 3D: Se utilizó la herramienta Blender en su versión 2.28 para crear los modelos tridimensionales de los edificios de la institución. Estos modelos se basaron en los planos proporcionados por la institución y fueron utilizados tanto en el mapa en 2D como en la simulación. [12],[13].

Para la creación de los modelos en 2D y 3D, se colaboró con la institución para obtener los planos de cada edificio, lo que proporcionó información sobre las dimensiones y escalas necesarias. Además, se tomaron fotografías de áreas específicas en la institución para usarlas como texturas personalizadas en los edificios. En la figura N° 15 se puede ver el modelo trabajado en base a los planos proporcionado por la institución.

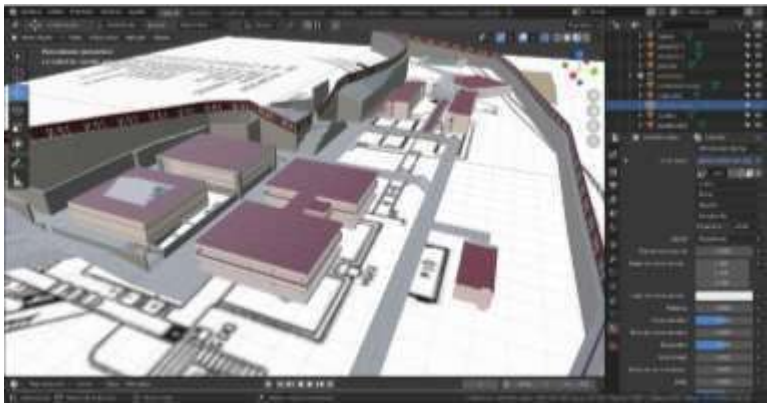


Figura 15. Modelo de los edificios en base a los planos de la institución.

A partir de los modelos en 3D de los edificios, se extrajo la parte superior de cada piso para crear los planos en 2D, asegurando que mantuvieran las mismas proporciones que los modelos en 3D correspondientes.

Durante todo el proceso, se mantuvo una validación constante de los datos y modelos generados para garantizar su coherencia y precisión. Esto permitió crear modelos confiables y

visualmente impactantes que proporcionaron a los usuarios una experiencia de navegación precisa y auténtica en el campus de la UPIIZ.

Programación e implementación: Se llevó a cabo la programación de las funcionalidades y características del proyecto. Esto implicó la codificación de algoritmos y la implementación de lógica para lograr el funcionamiento deseado. Además, se realizó la integración con la base de datos para gestionar la información relacionada con el proyecto.

Estas actividades permitieron dar vida al proyecto, creando modelos tridimensionales precisos y programando las funcionalidades necesarias para su correcto funcionamiento. En la figura N° 16 se puede ver el modelo trabajado en Blender.

Figura 16. Representación 3D del modelo de la institución UPIIZ en Blender

El desarrollo de la herramienta se realizó utilizando Unity en su versión 2019.4.29. En esta plataforma, se llevaron a cabo diversas tareas para lograr el funcionamiento deseado.

Acoplamiento de modelos: Se integraron los modelos tridimensionales previamente creados en Blender dentro del entorno de Unity. Esto permitió visualizar los edificios y demás elementos en la herramienta.

Organización de escenas: Se crearon y organizaron las escenas en Unity de acuerdo con los diseños de interfaz previamente establecidos. Cada escena representa una parte específica de la herramienta y su funcionamiento [14].

Programación basada en el diagrama de clases: Se implementa la lógica del proyecto utilizando el diagrama de clases como guía. Se escribieron scripts en el lenguaje de programación C# para establecer la interacción entre los diferentes componentes y funcionalidades de la herramienta.
Integración con la base de datos: Siguiendo el diagrama de despliegue, se realizó la programación necesaria para interactuar con la base de datos no relacional. Esto incluyó solicitar y actualizar la información requerida para el correcto funcionamiento de la herramienta.

Funcionalidades basadas en casos de uso: Se implementan las funcionalidades de la herramienta en base a los casos de uso identificados. Esto permitió que cada parte de la herramienta cumpliera con sus objetivos específicos y proporcionase la interacción deseada con el usuario.

En resumen, el desarrollo de la herramienta se llevó a cabo en Unity, utilizando los modelos acoplados, las escenas organizadas, la programación basada en el diagrama de clases, la integración con la base de datos y la implementación de las funcionalidades según los casos de uso. Esto permitió crear una herramienta interactiva y funcional para los usuarios. En la figura N° 17 se ve la interfaz de Unity de una de las escenas del proyecto.

Figura 17. Vista del desarrollo de la interfaz de usuario con Unity.

Se estableció la conexión con la base de datos Real Time de Firebase, la cual es una plataforma gratuita de alojamiento de información. Firebase ofrece un límite de consultas y almacenamiento gratuito hasta cierto punto, lo que la hace una opción adecuada para este proyecto.

Firebase cuenta con actualizaciones constantes de sus SDK (Software Development Kits), los cuales son herramientas que facilitan la comunicación entre las aplicaciones y la base de datos. Estos SDKs permiten realizar consultas a la base de datos y acceder a la información almacenada.

Además de la base de datos, Firebase también ofrece el servicio de Autenticación, el cual fue utilizado en el apartado del administrador. Este servicio permite verificar y validar a los usuarios al momento de iniciar sesión en el apartado administrador de la herramienta. Esto garantiza la seguridad y control de acceso adecuados para la administración de la herramienta. [15], [16]

En resumen, se utilizó Firebase como la plataforma de alojamiento de información, aprovechando su base de datos Real Time y su servicio de Authentication. Los SDKs de Firebase se utilizaron para establecer la comunicación entre la herramienta y la base de datos, permitiendo consultar y almacenar la información necesaria para el correcto funcionamiento de la herramienta. La figura N° 18 muestra la interfaz de Firebase.

Figura 18. Interfaz de creación de base de datos en Firebase Realtime Database

El producto consta de dos herramientas, una diseñada para computadoras y otra para dispositivos móviles. En la primera escena, el usuario visualiza la bienvenida, así como una pequeña explicación de lo que hace cada uno de los botones que se visualizan. Figura N° 19.

Figura 19. Interfaz de bienvenida: pantalla de inicio de la aplicación

Al cerrar la ventana de bienvenida, el usuario puede visualizar la escena del mapa 2D y sus botones, donde puede interactuar con su entorno. Figura N° 20.

Figura 20. Interfaz de Mapa 2D: visualización de los lugares de la institución politécnica.

En el menú de inicio, hay una diferencia visual entre el móvil y el de escritorio. En el de escritorio se agrega la opción de inicio de sesión para el administrador.

En el menú de inicio, se puede seleccionar tanto el punto de inicio como el destino.

En la figura N° 21 es la interfaz del menú inicio visto en el dispositivo móvil, y en la figura N° 22 se visualiza la misma escena, pero para computadora.

Figura 21. Visualización del menú inicio en el dispositivo móvil

Figura 22. Visualización del menú inicio en la aplicación de escritorio

En el menú de búsqueda, el usuario puede seleccionar los espacios de interés a través del listado de espacios, mediante filtros o escribiendo el nombre del espacio. Figura N° 23.

Figura 23. Visualización del menú de búsqueda para los puntos de interés

En la simulación, una vez que el usuario ha seleccionado los puntos de interés, puede visualizar la ruta trazada, así como el tiempo estimado que tardará en llegar a su destino. También puede disminuir o aumentar la velocidad de la simulación. Figura N° 24.

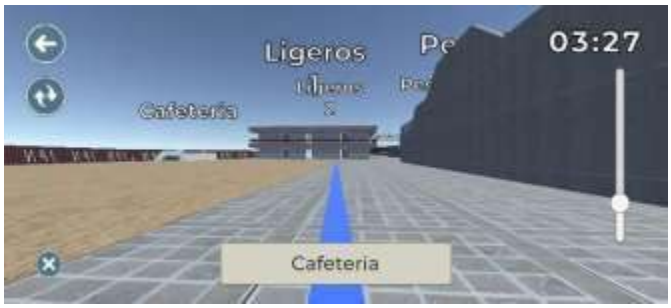


Figura 24. Escena mapa 3D: visualización del recorrido con un punto seleccionado.

Cuando el usuario administrador desea iniciar sesión, ingresa las credenciales válidas que le fueron asignadas. Si son correctas, se permite el acceso; en caso contrario, no se permite el acceso. Figura N° 25.

Figura 25. Inicio de sesión: credenciales de acceso.

Una vez que se ha iniciado sesión correctamente, el usuario visualiza el mapa 2D del administrador, donde puede interactuar con los espacios que conforman la institución, así como con los edificios y cada uno de los pisos que los conforman. Aquí es donde se crean, modifican o eliminan los espacios que conforman la institución. Figura N° 26.

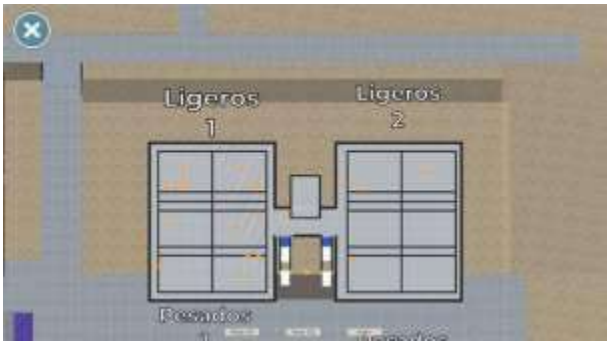


Figura 26. Visualización de la interfaz para la creación, eliminación y edición de los puntos de interés.

Cuando el usuario desea agregar un nuevo punto para un espacio, visualiza una escena que permite hacerlo. Figura N° 27.

Figura 27. Visualización del menú edición: crea un nuevo punto.

2.4 Pruebas

Una vez alcanzada esta etapa, se realizaron las pruebas relativas para verificar y comprobar que las herramientas funcionaban correctamente. Se realizaron las siguientes pruebas enumeradas en la Tabla 3. [17], [18]

A continuación, se detallan las pruebas relevantes realizadas para validar la funcionalidad de la herramienta utilizando la nomenclatura mostrada.

Pruebas unitarias de usuario (PUU): estas pruebas están destinadas a validar la funcionalidad específica del usuario de las herramientas móviles, como la visualización de rutas y tiempos estimados, la interacción de la escena y los cálculos requeridos. Todas estas acciones se comprueban para su correcta ejecución.

Pruebas unitarias del administrador (PUA): estas pruebas verifican que ciertas funciones del administrador de herramientas de escritorio funcionen correctamente. Esto incluye iniciar sesión, ver el mapa correspondiente, agregar y modificar puntos y todas las demás funciones relacionadas con la gestión de herramientas.

Pruebas del sistema de usuario (PSU): estas pruebas se centran en evaluar el rendimiento general del sistema desde la perspectiva del usuario. Se verifican las interacciones entre diferentes escenas, la visualización correcta de la información, la precisión de los cálculos de ruta y tiempo y todas las demás funciones relacionadas con el usuario.

Pruebas del sistema del administrador (PSA): al igual que las pruebas anteriores, estas evaluaciones se centran en el rendimiento general del sistema desde la perspectiva del administrador. Se verifican las interacciones entre escenas de administración, la corrección de las funciones de administración de puntos, la seguridad de inicio de sesión y todas las demás características relacionadas con la administración.

Pruebas de integración de bases de datos (PIB): estas pruebas verifican la integración adecuada entre las herramientas utilizadas y las bases de datos no relacionales. Se evaluará la capacidad de solicitar y actualizar información almacenada en la base de datos para garantizar la coherencia y confiabilidad de los datos utilizados por la herramienta. Pruebas de integración de usuarios (PIU): estas pruebas se centran en evaluar las interacciones entre herramientas móviles y bases de datos desde la perspectiva del usuario. Comprueba si la herramienta puede acceder y utilizar información relevante almacenada en la base de datos, como rutas y puntos seleccionados.

Prueba de integración del administrador (PIA): al igual que la prueba anterior, esta prueba se centra en las interacciones entre las herramientas de escritorio utilizadas por los administradores y la base de datos. Se ha validado que la herramienta puede acceder a información almacenada en una base de datos y utilizarla para gestionar puntos de forma eficaz.

Estas pruebas se ejecutan para garantizar que las herramientas desarrolladas funcionen correctamente y cumplan con los requisitos especificados. Tabla 3.

Tabla 3. Resumen de los tipos de pruebas realizadas

Tipo de Prueba	Pruebas del sistema
	Cantidad de pruebas
PUU	16
PUA	9
PSU	8
PSA	5
PIB	1
PIU	2
PIA	3

Durante la fase de prueba de la herramienta no se consideró la posibilidad de actualizar el SDK del servicio de base de datos. Esta actualización resultó ser necesaria para nuestro proyecto y requería una versión más nueva de Unity que antes. Esto dio lugar a ciertas incompatibilidades. En este punto, la biblioteca actualizada introdujo cambios que desaprobaron algunos comandos utilizados en versiones anteriores de Unity.

Se han identificado dos enfoques principales para corregir y mitigar estos errores. Una es actualizar Unity a una versión compatible más nueva y la segunda es dividir las herramientas en dos proyectos separados para separar las aplicaciones de escritorio y móviles.

2.5 Mantenimiento

Durante la etapa de mantenimiento del proyecto se elaboraron tres manuales con el propósito de ofrecer información detallada y directrices sobre el uso, implementación y mantenimiento de la herramienta. Estos manuales tienen como objetivo principal garantizar el adecuado funcionamiento y la continuidad de la aplicación, proporcionando la información necesaria tanto para los usuarios finales como para los desarrolladores.

El Manual del Usuario ha sido diseñado para asistir a los usuarios en la correcta utilización de la herramienta, ofreciendo explicaciones detalladas sobre el funcionamiento de cada elemento en diversos escenarios. Por otro lado, el Manual Técnico brinda una visión interna de las funciones subyacentes de la aplicación. Incluye información acerca de los requisitos técnicos necesarios en la computadora para ejecutar el proyecto y una descripción minuciosa de cómo operan las diferentes partes y componentes de la aplicación.

Adicionalmente, se ha desarrollado un Manual de Mantenimiento con el propósito de facilitar las futuras actualizaciones y mejoras, proporcionando instrucciones paso a paso para la sustitución de elementos. Durante el proceso de mantenimiento, el equipo responsable abordó y solucionó los errores señalados en la interfaz de usuario, mejorando así la experiencia del usuario. Además, se realizaron actualizaciones en los modelos para reflejar los cambios en el entorno de la ciudad universitaria, asegurando así la actualización constante de la información. Estos manuales proporcionan la información esencial para el correcto uso de las herramientas, facilitando su implementación en otros dispositivos y simplificando las tareas relacionadas con futuras actualizaciones y mejoras.

3. Resultados

En esta sección, se presentan los resultados de la evaluación de la aplicación mediante una encuesta dirigida a los alumnos de la institución. El objetivo principal de esta evaluación fue analizar la satisfacción de los usuarios y comprender mejor cómo la aplicación aborda el desafío que enfrentan tanto los alumnos de la institución como las personas externas al tratar de localizar lugares específicos dentro del campus. Este problema suele dar lugar a retrasos y frustraciones en la experiencia de navegación de los usuarios.

Para llevar a cabo esta evaluación, se realizaron entrevistas a los alumnos de la institución durante la primera semana de su ingreso. Se les solicitó que descargaran la aplicación y se les brindó un tiempo para familiarizarse con ella antes de completar la encuesta. Se recopilaron un total de 122 respuestas de una población de 900 alumnos. La mayoría de los encuestados eran estudiantes de nuevo ingreso, representando el 61% del total, mientras que el restante correspondía a alumnos de semestres superiores que también habían utilizado la aplicación. Como se puede observar en la figura N° 28

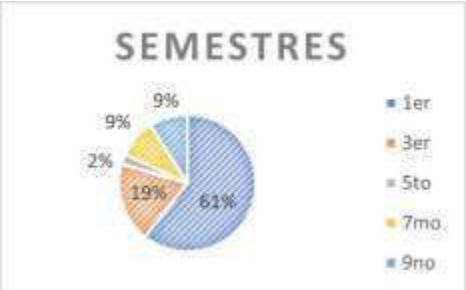


Figura 28. Cantidad de encuestado en base al semestre.

Los resultados revelaron una respuesta mayormente positiva por parte de los usuarios, teniendo un 100% de agrado hacia la aplicación. Por otro lado, se les pregunto si habían encontrado los lugares de su interés al momento de usar la aplicación, a lo que se tuvo que el 97% logro haber encontrado el lugar que buscaba gracias al uso de la aplicación, como se puede observar en la figura N° 29. Se les pidió comentar el lugar que no habían encontrado para agregarlo en próximas actualizaciones.

Figura 29. Cantidad de encuestado en base al semestre.

Uno de los hallazgos más significativos fue que el 100% de los encuestados mencionó que la aplicación les facilitó la búsqueda de ubicaciones dentro de la UPIIZ, lo que se traduce en una mejora sustancial en la experiencia de navegación. Los comentarios proporcionados en las encuestas subrayaron la utilidad de la herramienta, especialmente para los estudiantes de nuevo ingreso que se encuentran aún más desorientados en su entorno.

Los estudiantes que participaron en la encuesta expresaron una amplia satisfacción con la herramienta "Mapa interactivo para la localización de los espacios de la UPIIZ". Apreciaron su utilidad para encontrar ubicaciones dentro de la institución, especialmente los estudiantes de nuevo ingreso. Hubo menciones positivas sobre la idea y el diseño de la aplicación, así como sugerencias para mejorar la velocidad y la interactividad. En general, la aplicación fue considerada eficiente y útil, con un gran potencial para facilitar la navegación dentro de la UPIIZ. Los alumnos destacaron su importancia tanto para estudiantes como para visitantes. También se mencionó que podría ser una herramienta valiosa para localizar a los profesores en tiempo real. A pesar de algunas áreas de mejora señaladas, la mayoría de los estudiantes evaluaron positivamente el proyecto y lo consideraron beneficioso para la comunidad educativa.

4. Conclusión

En esta sección, se resumen los avances significativos logrados en el proyecto. A lo largo del desarrollo de esta herramienta innovadora, se ha abordado con éxito el desafío de proporcionar a los usuarios una solución eficaz para la orientación y la localización de espacios internos y externos dentro de la institución. La implementación de tecnologías de ubicación y la creación de modelos en 3D han permitido mejorar la experiencia del usuario, brindándoles una herramienta versátil que facilita la navegación en tiempo real y la identificación de áreas de interés.

El proyecto ha demostrado ser especialmente valioso para los estudiantes de nuevo ingreso, quienes a menudo se enfrentan a la dificultad de encontrar áreas específicas dentro de la UPIIZ. Los resultados obtenidos de encuestas realizadas a los alumnos reflejan un alto nivel de satisfacción y mejoras significativas en la navegación dentro de la institución.

Mirando hacia el futuro, el proyecto "*Mapa interactivo para la localización de los espacios de la UPIIZ* " ofrece oportunidades para continuar mejorando y expandiendo sus capacidades. Se pueden considerar actualizaciones adicionales, como la incorporación de nuevas características o la optimización de la interfaz de usuario para una experiencia aún más intuitiva. Además, el enfoque en el desarrollo centrado en el usuario puede seguir siendo un pilar fundamental para futuras iteraciones,

garantizando que las necesidades y preferencias de los usuarios sigan siendo una prioridad.

En resumen, el proyecto ha alcanzado sus objetivos al proporcionar una solución efectiva y vanguardista para la ubicación y navegación dentro de la UPIIZ. El trabajo futuro se centrará en mantener y mejorar continuamente esta herramienta, asegurando que siga siendo una contribución valiosa para la comunidad educativa y un ejemplo de cómo la tecnología puede enriquecer nuestras experiencias cotidianas.

Referencias

[1] Sommerville. (2011). *Ingeniería de Software 9na Edición. México: PEARSON EDUCACIÓN.*

[2] Barrera, J. A., & Barrera, S. A. (2020). *Metodologías para el desarrollo de Proyectos. Metodologías de Proyectos. Administración de Empresas*, 5-6,

[3] IBM Cloud Education. (28 de Octubre de 2020). *Arquitectura de 3 niveles*. Obtenido de IBM: https://www.ibm.com/mx- es/cloud/learn/three-tier-architecture

[4] OKDIARIO. (09 de 11 de 2018). *Qué es un diagrama de clases*. Obtenido de OKDIARIO: https://okdiario.com/curiosidades/que-diagrama-clases- 3323710

[5] Fonseca, L. (27 de Junio de 2022). *Cómo crear un diagrama de clases*. Obtenido de Venngage: https://es.venngage.com/blog/diagrama-de- clases/

[6] creately. (18 de Octubre de 2022). *La Guía Fácil de los Diagramas de Despliegue UML*. Obtenido de creately: https://creately.com/blog/es/diagramas/tutorial-de-diagrama-de- despliegue/

[7] UNAD. (s.f.). *Diagramas de Actividades*. Obtenido de UNAD: https://unadzsurlab.com/UML/U1/diagramas_de_actividades.html

[8] Creately. (9 de Septiembre de 2022). *Use Case Diagram Relationships Explained with Examples*. Obtenido de Creately: https://creately.com/blog/diagrams/use-case-diagram-relationships/

[9] OCI. (31 de Julio de 2014). *¿Qué es una base de datos?* Obtenido de Oracle Cloud: https://www.oracle.com/mx/database/what-is-database/

[10] EmprenderAConciencia. (s.f.). *Diseño de prototipos*. Obtenido de EmprenderAConciencia: https://www.emprendeaconciencia.com/diseno- prototipo

[11] Blender. (20 de 06 de 2019). *Blender* 2.8. Obtenido de https://www.blender.org/download/releases/2-80/

[12] Blender. (13 de Noviembre de 2022). *Manual*. Obtenido de Blender: https://docs.blender.org/manual/es/dev/getting_started/about/introductio n.html

[13] Unity. (11 de 04 de 2019). *Construyendo un NavMesh*. Obtenido de UnityDocumentation: https://docs.unity3d.com/es/2019.4/Manual/navBuildingNavMesh.html

[14] Firebase. (26 de 05 de 2016). *Pricing*. Obtenido de Firebase: https://firebase.google.com/pricing

[15] Firebase. (03 de 10 de 2017). *Firestore*. Obtenido de Firebase: https://firebase.google.com/docs/firestore

[16] IBM. (16 de 05 de 2022). *¿Qué es la prueba de software?* Obtenido de IBM: https://www.ibm.com/mx-es/topics/software-testing

[17] Turrado, J. (11 de 03 de 2020). *Qué son las pruebas de software*. Obtenido de CampusMVP.es: https://www.campusmvp.es/recursos/post/que-son- las-pruebas-de-software.aspx

[18] Agencia Informatica Conacyt, «El diario,» NTR, 10 Mayo 2016. [En línea]. Available: https://www.ntrguadalajara.com/post.php?id_nota=38529. [Último acceso: 06 04 2022].

[19] VelSid, «La Republica de ideas,» 22 Mayo 2015. [En línea]. Available: https://gastronomiaycia.republica.com/2015/05/22/gps-para-encontrar-los-alimentos-en-un-supermercado/.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 20, pp. 246 - 256
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Panel de evaluación para la coordinación viso motriz

Cruz González Amellalli Ixchel, Coeto Huerta Emilio Alberto, Rojas Rodríguez Rafael, Aburto Cortés Obed y Canchola Chávez Marco Antonio

Universidad Politécnica de Puebla, Tercer Carril del Ejido, Serrano s/n, Cuanalá, 72640 Puebla, Pue.
222 774 6640, amellalli.cruz1479@uppuebla.edu.mx

Resumen

El panel de evaluación para la coordinación viso motriz consiste en la evaluación cronometrada de pacientes que sufren alguna enfermedad degenerativa debido a que dicho panel está construido por doce botones de cuatro colores diferente (azul, rojo, verde y amarillo) los cuales cuentan con un led integrado y mediante la programación realizada en un software simulador que tiene como finalidad encenderse de manera aleatoria, para que así el paciente pueda presionar el botón encendido, este mismo cuenta con niveles de dificultad para ir evaluando su avance en cada terapia, también cuenta con un cronometro el cual es cuantifica el tiempo evaluando la velocidad de respuesta de cada paciente.

Palabras clave: Terapia, coordinación, monitoreo, software, simulador.

1. Introducción

La En las instalaciones de CMUCH se realizan diferentes actividades para los pacientes las cuales se especializan en; Medicina de rehabilitación, medicina del deporte, traumatología y ortopedia, neurología, dermatología, psiquiatría, psicología, neuropsicología, psicología del deporte, tanatología, nutrición, fisioterapia, terapia ocupacional, terapia del lenguaje, gerontología y terapias artístico-creativas, así mismo cuentan con talleres para adultos mayores, en los cuales se lleva un registro de las actividades que se realizan cada semana, esto comprende a dos sesiones de 2 horas por semana.

CMUCH permitió las instalaciones a su servidora para poder realizar su estadía profesional para la intervención en la rehabilitación viso-motriz en pacientes que padecen enfermedades que afectan la motricidad como lo son; Parkinson, Ataxia, Distonía cervical, Trastorno funcional del movimiento. Pudiendo así brindarles una propuesta para poder realizar las terapias de una manera automatizada para su mayor facilidad en cuestión de verificar los avances que han tenido los pacientes. La rehabilitación viso-motriz consta de actividades de movimientos controlados, es decir que requieren de mucha precisión, donde se utilizan los procesos óculo manual en forma simultánea (ojo, mano, dedos), como lo son las acciones de cortar, pintar, rasgar, pegar, reaccionar, identificar, entre otras. Esto mismo para poder verificar el avance que se tiene en el paciente tomando su terapia.

Las sesiones que se les realizan a los pacientes que se encuentran en rehabilitación constan de 2 horas a la semana, las actividades que realizan en cada sesión constan de actividades en las cuales este presente la visión como lo es la identificación de colores y al mismo tiempo estén conectados los movimientos de la extremidad superior y así poder obtener un registro de su movilidad y su capacidad visual, debido a que dichas enfermedades son neurodegenerativas las cuales afectan al aparato locomotor y a lo largo que pasa el tiempo el cuerpo se vuelve débil y hace que no puedan valerse por sí mismos.

Durante el proceso de las terapias se tiene como finalidad dar un diagnóstico y poder generar el historial de cada paciente del comportamiento de su enfermedad, y observar su mejoría a lo largo de las sesiones.

1.1 Problemática

La rehabilitación para los adultos mayores requiere un proceso de sesiones en su terapia, las cuales tienen estrategias estigmatizadas del proceso para la verificación del diagnóstico y su avance. En consecuencia, desde el punto de vista de la ingeniería mecatrónica este proceso se requiere que sea automatizada debido a que con anterioridad solo se manejaba manualmente, puesto que al integrar la tecnología en estas sesiones de rehabilitación se considera que el proceso sea más didáctico, más atractivo para facilitar el proceso de los pacientes con enfermedades de alteración en el movimiento.

Con lo antes ya mencionado se considera realizar un prototipo que conduzca la rehabilitación de manera automática, partiendo de las necesidades que se requieren para las sesiones de los adultos mayores, en las cuales puedan tener la facilidad de sus terapias mediante un aparato que cuenta con una propuesta llamativa y didáctica, la cual se identificaran los colores de manera aleatoria, se medirá su velocidad de respuesta esto a lo largo de las sesiones de una hora.

Dicho prototipo constará de una parte visual con 12 botones de 4 colores diferentes (rojo, azul, amarillo y verde), este mismo será diseñado ergonómicamente para que los adultos mayores puedan realizar la actividad de manera cómoda, de igual manera estará diseñado para poder evaluar la velocidad de respuesta del paciente con tiempos determinados a (10 segundos, 5 segundos, 3 segundos y 1 segundos) para poder así observar su avance en el proceso de su padecimiento, dándole así una doble utilidad como un pronóstico de ver que un paciente sea propenso a padecer de alguna enfermedad que afecte su movilidad, de acuerdo con las funciones que va a realizar el Panel.

Al termino de cada terapia se tendrá un registro de cada paciente mediante una bitácora con información obtenida de cada sesión y el progreso de sus capacidades motrices.

2. Marco Teórico

Las enfermedades neurodegenerativas (END) incluyen numerosos procesos, que están adquiriendo un gran protagonismo debido al envejecimiento de la población, dada su alta prevalencia y coste social. Definimos enfermedades neurodegenerativas aquellas patologías, hereditarias o adquiridas, en las que se produce una disfunción progresiva del Sistema Nervioso Central (SNC).

Particularmente en la enfermedad de Parkinson se requiere de una terapia basada en lo viso motricidad debido a que dicha enfermedad ataca gran parte del movimiento y por ende también en la parte visual, lo cual provoca no poder realizar actividades básicas como lo son; atarse los zapatos, abrir las puertas, abotonarse, e incluso comer solos.

2.1 Control de la Postura y Movimiento

El control del movimiento depende de estímulos sensitivos (aferentes) que se originan en órganos receptores de distintas partes del cuerpo (piel, articulaciones, tendones y músculos) que se suman a la información generada por órganos de los sentidos para conformar un complejo de información que llegan a distintas zonas del cerebro (Corteza, núcleos del cerebro medio) y cerebelo; donde se registran, se envían zonas de asociación y zonas donde se emiten respuestas (información eferente) en estas se originan, coordinan y reorganizan mientras ocurren en muchos casos.

En la figura (1) se observan áreas importantes del cerebro que están relacionadas con la capacidad del movimiento en el ser humano. El control motor del cuerpo depende de patrones y frecuencias de descarga de las motoneuronas espinales (en varios segmentos espinales, tallo encefálico y corteza cerebral) y neuronas homólogas de núcleos de los nervios craneales.

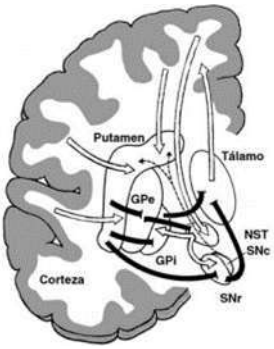


Figura 1. Núcleos de los ganglios basales.

En la figura (2) se puede observar cómo están seccionadas las redes neuronales internas, junto con los ganglios basales para correlacionar el comportamiento motriz del ser humano. [1]

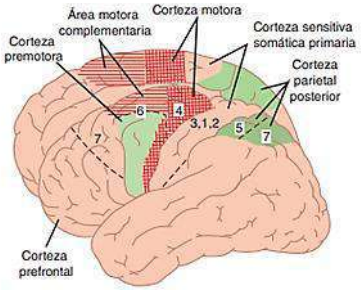


Figura 2. Áreas corticales asociadas al control del movimiento.

La actividad voluntaria se planifica con patrones básicos de movimiento desde el encéfalo y es enviada a los músculos por las vías del sistema corticoespinal y corticobulbar; la postura y su control es suavizada por sistemas reguladores; el movimiento se coordina por porciones media e intermedia de cerebelo (Espinocerebelo) y sus conexiones, y se suaviza por la acción de los ganglios basales y las porciones laterales del cerebelo (neocerebelo) que forman parte de un circuito que realimenta a la corteza premotora y motora que planea y organiza el movimiento voluntario.

Los movimientos generados por esta intrincada red, planea, coordina y ejecuta patrones de movimientos conocidos también como engramas, su proceso de integración ocurre inicialmente en la médula espinal partiendo de reflejos simples que al repetirse un número importante de veces consiguen su integración abriendo la posibilidad de que un nivel superior tome el control de la activación, el control desde este nivel superior involucra un número mayor de conexiones incrementando el nivel de complejidad de las respuesta reflejas.

En este punto, si el neuroeje es seccionado, las respuestas de niveles inferiores son liberadas del control de los centros superiores generando una competencia por el control de los patrones de movimiento que se traduce en movimientos de mala calidad.

2.2 Equilibrio

El equilibrio en el adulto mayor cambia de manera progresiva negativamente con la posibilidad de generar e incrementar su discapacidad.

Algunos reportes sugieren que adultos mayores que no son capaces de recuperar el equilibrio de su centro de gravedad en alrededor de 145 ms pueden caer.

Los cambios estructurales y funcionales negativos asociados al envejecimiento están ligados también al envejecimiento del sistema somato sensorial que se manifiesta en la postura, velocidad de reacción y movimiento.

El sistema somato sensorial involucra Usos Musculares, Órganos Tendinosos de Golgi y receptores articulares y cutáneos, y sus vías neuronales; la evidencia clínica sugiere que el avance del envejecimiento se produce como consecuencia de: [2]

- Cambios no uniformes en las estructuras sensoriales y sus vías neurológicas.
- Pérdida de distal de mielina de fibras y receptores sensoriales.
- Pérdida distal de la sensibilidad propioceptiva, sensación de vibración, tacto discriminativo y balance de miembros inferiores.

2.3 Ganglios Basales

Son un grupo de núcleos grises situados en la base de los hemisferios cerebrales. El Núcleo estriado (Caudado y Putamen), Globus Pallidus (segmento lateral [GPl] y medial [GPm]) el núcleo subtalámico (NST) y al Sustancia Nigra (Pars reticulada [SNr] y Pars compacta [SNc]).

Los ganglios basales se conectan con estructuras motrices corticales, al Córtex asociativo y al sistema límbico; la organización funcional es de tipo somato tópica en los componentes sensoriomotores y predominan más en la organización de los movimientos más que la representación de músculos o segmentos corporales.

Los GB están situados en paralelo con respecto a la vía piramidal ejerciendo una actividad regladora compleja sobre la actividad motora primaria provocando en su lesión trastornos de tipo no paralitico (Flacidez o espasticidad), su lesión provoca alteraciones distónicas, discinéticas secundarias a la imposibilidad de procesar de manera correcta las aferencias físicas asociadas a la información propioceptiva incrementando la dificultad de impedir movimientos indeseados. (bibliografía 3)

La coordinación viso motora es el resultado de un ajuste entre la mano y el ojo tanto que se necesita manejar y reconocer el espacio y el desarrollo del equilibrio y la fuerza motora, por lo que es uno de los motores fundamentales de la viso motricidad en sí misma.

En la figura (2) se muestra un esquema grafico del interior del cerebro en el cual se observa que esta correlacionado con partes fundamentales del sistema motriz del ser humano.

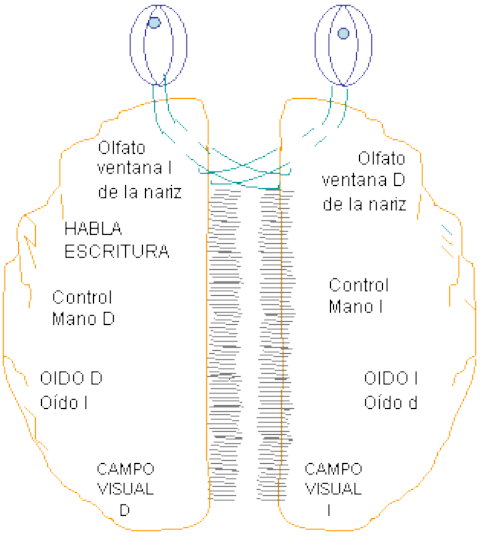


Figura 3. Relación de los movimientos con las áreas cerebrales.

Marianne Sánchez Saviñón y colaboradores realizaron un estudio de intervención, del tipo Pre-Experimento sin grupo control en un universo de 20 pacientes atendidos en el Centro Internacional de Restauración Neurológica (CIREN) con diagnóstico de Parálisis Cerebral en el periodo 2016 al 2018, para la aplicación de la Estrategia Interventiva que se propone. Estas personas con necesidades educativas especiales conforman el grupo de estudio, los cuales fueron seleccionados de forma intencional con los siguientes criterios: [3]

Criterios de Inclusión

- Voluntariedad del paciente y de sus familiares.
- Presentar trastorno de coordinación óculo-manual, trastornos de memoria y/o atención, o un deterioro cognitivo ligero documentado en la evaluación neuropsicológica inicial y que no presenten ninguno de los siguientes criterios de exclusión.

Criterios de Exclusión

- Déficit lingüístico severo que le imposibilite la comprensión y la comunicación verbal y no verbal.
- Déficit sensorial severo.
- Trastornos de conducta y/o psiquiátricos que comprometan su participación en el trabajo del laboratorio.

La coordinación ojo-mano, también denominada coordinación óculo motora, óculo manual, o viso motriz utilizamos los ojos para dirigir la atención y ayudar a saber a nuestro cerebro dónde se sitúa nuestro cuerpo en el espacio (propiocepción), empleamos las manos para ejecutar una tarea determinada de manera simultánea y coordinada, en base a la información visual.

Para lograr en el menor tiempo posible la mayor recuperación de las capacidades perdidas, en correspondencia con el grado de afectación y el tiempo de evolución de la enfermedad o trauma. Está integrado por las siguientes pruebas: Sistema Integral de análisis motor, mediciones goniométricas, controles de dinamometría general y especial, test psicométricos, test psicopedagógicos, pruebas funcionales musculares, pruebas de autovalidismo entre otras. [4]

En términos generales, la viso motricidad es la capacidad que tiene el ser humano para orientar sus movimientos entre la vista y el cuerpo. Por ende, toda actividad motriz ayuda al desarrollo del individuo, al ser la que le permite el control de su propio cuerpo.

Se puede dividir en: motricidad fina (este tipo de motricidad está implicada en movimientos que requieren mayor precisión), motricidad gruesa (este tipo de motricidad hace referencia a la ejecución de movimientos más globales en las que está involucrada la cabeza, el tronco y las extremidades). [5]

Una de las características de la coordinación viso motriz es el ajuste de movimientos a partir del control de la vista. La base principal es el componente neurológico, a partir de este factor los alcances que puede tener, dependerán de la estimulación individual y del ambiente más cercano del niño. [6]

La coordinación viso motriz es fundamental para lograr un correcto agarre, implicando el ejercicio de movimientos controlados y deliberados que requieren de mucha precisión, requiriéndose, en las tareas dadas donde se utilizan de manera simultánea el ojo, mano, dedos, por ejemplo: rasgar, cortar, pintar, colorear, enhebrar, escribir, entre otros.

La coordinación muscular o motora es la capacidad que tienen los músculos esqueléticos del cuerpo de sincronizarse bajo parámetros de trayectoria y movimiento. El resultado de la coordinación motora es una acción intencional, sincrónica y sinérgica. [7]

2.4 La Coordinación Ojo-Mano

La coordinación óculo manual es un sofisticado acto que requiere de un proceso de gobierno en la sincronización de interconexiones de los sistemas visual y motor manual.

Requiere de temporización de habilidades motoras para lograr la pinza de pequeños objetos favorecida por una alta calidad de información visual del medio ambiente y el simultáneo ajuste del sistema visual y motor.

Su existencia obedece a múltiples áreas de control motor de la corteza cerebral, ganglios basales y cerebelo. Las cerebrales ubicadas en estructuras frontales, parietales para coordinar la acción de los ojos y la posición de la cabeza, además de núcleos cerebrales. Ambos, el Córtex y el cerebelo contribuyen con elementos de coordinación de la coordinación de la función óculo manual que con la lesión de cualquier estructura pueden separar su complicando así este proceso.

El cerebelo orquesta un fluido de señales motoras que descienden, dándoles temporalidad y ubicación espacial.

En este artículo se compara el control del movimiento en paciente con secuelas Enfermedad Vascular Cerebral con Enfermedad Vascular Cerebelar haciendo énfasis en la en la disociación de la coordinación óculo manual.

Rizzo y colaboradores, estudiaron 2 pacientes con accidente vascular, la selección de la muestra fue a conveniencia, un caso de EV cerebral y otro de EV cerebeloso con el objetivo de demostrar que los déficits de ambas lesiones son de diferente manifestación. [8]

Figura 1. La Coordinación Ojo-Mano.

2.5 Recuperación de la Coordinación Viso Motriz

La coordinación viso motriz implica el ejercicio de movimientos controlados y deliberados que requieren de precisión.

Las alteraciones del cerebelo y de sus vías de entrada y de salida producen déficit en la cantidad, la amplitud y la fuerza del movimiento. En las lesiones estáticas encefálicas las extremidades superiores y sus articulaciones constituyen uno de los segmentos más afectados en la ejecución de los movimientos. [9]

Las enfermedades que lesionan el cerebelo, la médula espinal y los nervios periféricos pueden interferir con la coordinación de los movimientos musculares y causar movimientos musculares espasmódicos y toscos. [10]

El grado de incoordinación manifiesto en pacientes que se aquejan de esta enfermedad se debe esencialmente, a una lesión de las vías que retroalimentan o informan al cerebro de la posición en el espacio de la cabeza o las extremidades Al disminuir o dañarse de alguna forma las funciones del brazo y la mano se afectan actividades funcionales como: abotonar, acordonar, abrir y cerrar puertas, encender luces, asearse, vestirse, comer, etc. [11]

Figura 5. Ejercicio para la Coordinación Viso Motriz.

3. Resultados

Para la creación del panel se consideró los rangos de movimiento adecuados en cuestión del brazo, codo y la altura en la que debe estar posicionado el paciente para un mejor manejo de movimiento, por lo que se consideró que Las dimensiones del tablero serán de 65cm x 50 cm dichas medidas se establecieron respetando la aducción del hombro a 60° sobre el plano horizontal para alinearse con el plano escapular el cual se encuentra a 30° hacía en frente del plano central y una flexión de hombro menor a 90°.

Puesto que el diseño del panel fue realizado en el software SolidWorks el cual respetando las dimensiones antes ya mencionadas se logró el objetivo el cual se muestra a continuación en la figura (6).

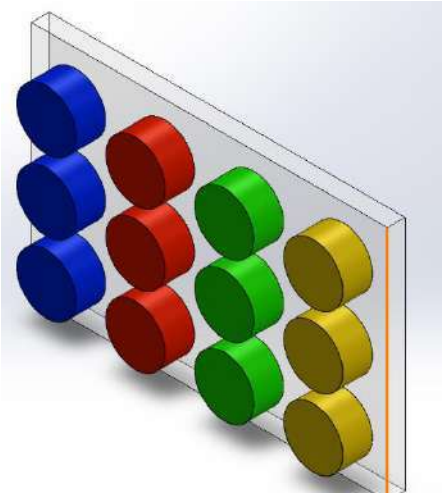


Figura 2. Diseño del Panel en CAD.

Una vez logrado el diseño en CAD se realizó dicho panel en físico utilizando material adecuado para la resistencia al momento de ejercer una fuerza sobre él y respetando las dimensiones ya mencionadas, por lo que se tuvo que construir con acrílico de 6mm para la resistencia, se insertaron 12 botones de 4 colores diferentes, se colocaron 3 botones por cada color para obtener un resultado final como el que se muestra en la figura (7).

Figura 7. Estructura física del panel.

Para poder concretar con las necesidades requeridas se tuvo que realizar una programación necesaria para el cumplimiento de las condiciones, las cuales son diseñadas en base de micro switch con leds integrados los cuales se encienden de manera aleatoria en tiempos determinados establecidos por el fisioterapeuta (10 segundos, 5 segundos, 3 segundos y 1 segundo).

Se utilizo un equipo en cual tiene un procesador Intel(R) Core (TM) i5-10300H CPU @ 2.50GHz 2.50 GHz, con una memoria RAM instalada de 8.00 GB (7.84 GB usable), cuenta con un sistema operativo de 64 bits, procesador basado en x64.

De acuerdo con los requerimientos necesarios se ocupó el software LabVIEW ya que cuenta con un panel frontal en el que se observa la secuencia y la simulación de cómo es que funcionara físicamente el prototipo.

Dicha programación cuenta con el arranque del ciclo, el cual consiste en 10 niveles de dificultad, por lo que los leds se encenderán de manera aleatoria mientras que al mismo tiempo se inicia el cronometro el cual su función será medir el tiempo de respuesta del paciente, ya que con esos tiempo se podrá determinar el avance de cada usuario, para ello se generó una estadística con tiempo de personas sanas y personas que padecen de alguna enfermedad neurodegenerativa, esto se realizó para poder tomarlo como base y poder dar un pronóstico a un usuario que pueda ser propenso a padecer alguna enfermedad y así poder tratarla a tiempo y no siga avanzando.

Se da inicio a la programación por lo que de manera aleatoria irán encendiendo los botones para que el paciente logre identificarlos y presionarlo con la velocidad que normalmente trabaja, a continuación, en la figura (8) se muestra el panel frontal del software que se utilizó.

Posteriormente se tienen dos casos en el cual si logras acertar correctamente todos los botones te saldrá un dialogo donde te indicara que tus respuestas fueron correctas y podrás iniciar de nuevo el ciclo de la secuencia, así como del lado izquierdo se logra observar el cronometro que se encargara de medir la velocidad de reacción del usuario, tal como se puede observar en la figura (9).

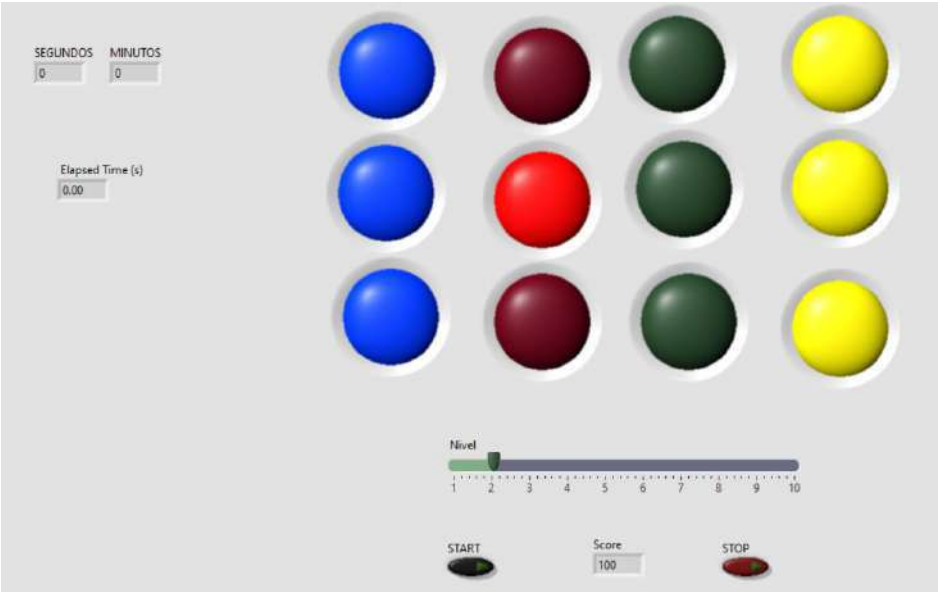


Figura 3. Panel frontal de arranque de programa.

Figura 4. Panel frontal del caso 1 donde el usuario lo hizo correctamente.

En el segundo caso nos encontramos con todo lo contrario al caso 1 en este el usuario se equivocó de botón por lo que en automático rechaza la respuesta y manda un mensaje donde pide que vuelvas a iniciar la secuencia para tomar en cuenta los tiempos de reacción, así como se muestra en la figura (10).

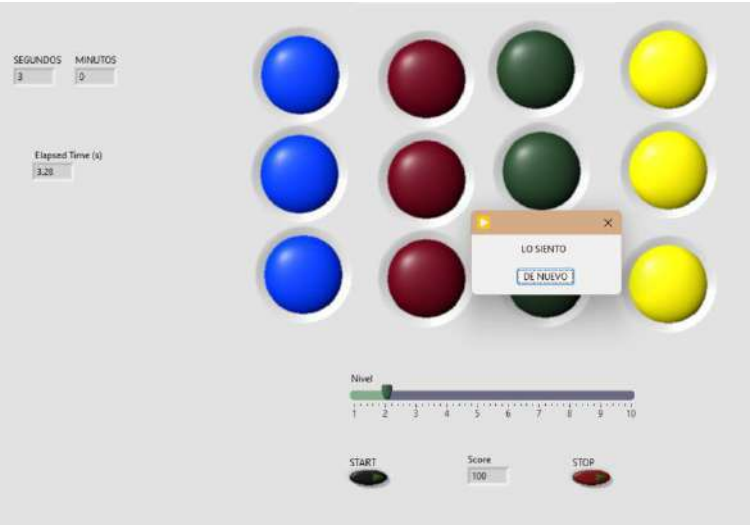


Figura 10. Panel Frontal en el caso 2 donde el usuario lo hizo de manera incorrecta

4. Conclusión

Podemos concluir haciendo énfasis en que por lo general el área de la salud y la Ingeniería Mecatrónica son dos ramas diferentes, pero ambas pueden complementarse para un bien común, por lo que se muestra en este proyecto, es que la mecatrónica al unirse con el área de la salud se crea un prototipo funcional el cual ayuda a los fisioterapeutas para poder tener monitoreados a pacientes que padecen alguna enfermedad neurodegenerativa, por lo que aprendimos que por más distintas que sean la áreas ambas al fusionarse se pueden crear nuevos proyectos en los cuales ambas áreas se ven beneficiadas, hablando en general de este proyecto podemos afirmar que como en el área de la salud le funciona para tener una actividad automatizada, con características que hacen didáctica la terapia y la hacen llamativa debido a la intervención de la ingeniería mecatrónica la cual actúa de una manera en la que hacen más sencilla y entretenida la terapia, debido a los dispositivos extensos que tenemos para programar y hacer que todo tenga un sentido común y sea satisfactorio para dichas áreas.

Actualmente contamos con este proyecto, el cual consiste en emitir una luz mediante el botón con un micro switch el cual al mismo tiempo tendrá un cronometro el cual funciona para evaluar el tiempo de reacción del paciente y a lo largo de sus consultas poder monitorear su avance, de igual manera esta herramientas nos funciona para poder analizar a otras persona que puedan ser propensos a padecer alguna enfermedad neurodegenerativas, esto con las estadísticas que se realizan en personas sanas y personas enfermas, este proyecto es de bastante ayuda a los fisioterapeutas ya que se les facilita el trabajo para poder tener un análisis concreto de cada paciente.

Dicho proyecto si funciona de manera en la que esta establecida y de acuerdo con los requerimientos del fisioterapeuta, actualmente seguimos realizando pruebas para tener una estadística puntual de los requerimientos para poder brindar un diagnostico certero.

Como plan futuro se tiene como propuesta realizar una estadística en la cual contaremos con la ayuda de personas sanas y personas que padecen de alguna enfermedad neurodegenerativa, para poder así tener un rango de tiempo y poder determinar un tiempo promedio para determinar si eres propenso a padecer alguna enfermedad neurodegenerativa y poder atenderla a tiempo.

Referencias

[1] D. W. F. Gangong, Fisiología Medica, México D.F. : *Manual Moderno* , 1992.

[2] Á. G. L. M. G. R. P. F. N. Álvarez González Eduardo, «*Función de los Ganglios Basales y El Papel del Núcleo Subtalámico en Transtornos del Movimiento*».

[3] R. G., Manual de educación psicomotriz., España: Toray-Masson., 2018.

[4] J. M. V.-D. F. O. J. Berthoz A, *L'experience visualle est-elle necéssaire a la*, Paris : Comptes rendus de l' Académie des., 2015.

[5] B. M. N. T. F. F. F. G. B. L. G. S. S. A. R. C. H. T. Rizzo JR, «T*he complexity of eye-hand coordination: a perspective on cortico-cerebellar cooperation*.,» Cerebellum & Ataxias, 13 noviembre 2020. [En línea]. Available: https://cerebellumandataxias.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40673-020-00123-z. [Último acceso: 13 marzo 2023].

[6] A. M. W. Bergado Rosado J, «*Mecanismos celulares de la neuroplasticidad*,» *Revista de Neurologìa,* vol. 11, nº 1074, p. 31, 2000.

[7] R. E. A. C. P. J. A. J. Bascuñana H, «*Mètodos de Potenciaciòn Muscular*,» *Rehabilitaciòn ,* nº 411, p. 22, 1996.

[8] K. C. Thomas W. Malone, «*Toward an interdisciplinary study of coordination.,*» abril 1991. [En línea]. Available: https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/2356/SWP-3294-23946943-CCS-TR-120.pdf?sequence=1. [Último acceso: 15 Febrero 2023].

[9] R. A. Pérez N, «*Paralisis Cerebral: Esperanza en la investigaciòn,*» 2019.

[10] C. D., «*Reflexiones acerca del juego y actitud psicomotriz*.,» Buenos Aires , Instituto Gènesis, 1987, pp. 76-107.

[11] C. R., «*Bases teóricas y clínicas del diagnóstico y la rehabilitación neuropsicológica.,*» 26 mayo 2007. [En línea]. Available: http://psicopediahoy.com/bases-diagnostico-y-rehabilitacion-neuropsicologica/. [Último acceso: 17 marzo 2023].

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 21, pp. 257 – 274
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Sistema automatizado de análisis de datos experimentales en la caracterización de guías de onda

Valencia Hernández, Sergio Antonio[1], Córdova Sánchez, Ricardo[1], Valenzuela Rodríguez, Rafael[1], Silva Barranco, Javier[2], Morales Olán, Gema[3] y Moreno Zárate Pedro[4*]

[1] Tecnológico Nacional de México, Campus Comalcalco, Comalcalco, Tabasco.
[2] Tecnológico Nacional de México, Campus Acatlán de Osorio, Acatlán de Osorio, Puebla.
[3] Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba, Córdoba, Veracruz.
[4]Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, Puebla
*pemzamx@gmail.com

Resumen

El procesar la información obtenida en los laboratorios representa un reto monumental por la cantidad de datos que se trabajan. A esto se suma la falta de tiempo y/o desidia de los responsables de los proyectos, lo cual puede resultar en errores o pequeñas desviaciones, pues no se le presta la atención adecuada a encontrar herramientas que ayuden a facilitar el trabajo, centrándose solo en la obtención de resultados, sin importar si estos son obtenidos de manera rápida, ya que si bien, esto no es complicado para el caso que nos atañe, si es un proceso largo y tedioso. En este trabajo se presentan los resultados de las herramientas computacionales empleadas en la automatización del procesado de información, para el caso particular de este estudio; datos abstraídos de imágenes obtenidas al momento de caracterizar guías de onda, cuya información es necesaria para modificar los parámetros que influyen en su fabricación. Esta caracterización está centrada en los cálculos de las pérdidas por acoplo de los modos ópticos que son trasmitidos a través de las guías de onda, cuyos datos son adquiridos usando un sistema telescópico.

Palabras clave: Sistemas Automáticos, Procesamiento de Información, Automatización y Toma de decisiones.

1. Introducción

En los laboratorios, el no usar las herramientas adecuadas para modernizar y en muchos casos automatizar los procesos para la adquisición de datos y análisis de información obtenida en los arreglos experimentales, pude ocasionar una serie de errores como son:

1. **Errores humanos:** derivados del cálculo manual de los resultados o el análisis de datos también de manera manual, lo que conlleva a datos poco confiables y en el peor de los casos a la toma de decisiones incorrectas.

2. **Pérdida de tiempo y recursos:** en el análisis manual de los resultados obtenidos en laboratorio o el realizar algunas tareas que puedan ser automatizadas, lo que genera retrasos en la entrega resultados e informes, lo que afecta la eficiencia y rapidez con la que las decisiones se pueden tomar en un laboratorio de investigación.

3. **Falta de estandarización:** no menos importante al momento de realizar el cálculo de los resultados o análisis de la información y procesos que en ellos se inmiscuyan, puede dificultar la comparación de los resultados entre diferentes laboratorios y la interpretación de los mismos.

Para evitar estos problemas, es fundamental que los laboratorios implementen sistemas de gestión de la calidad y validen los métodos utilizados durante la realización de los trabajos. Un buen principio de esto es, tratar de automatizar procesos claves y con ello reducir el error humano [1]–[4]. La validación y automatización de estos métodos implica verificar que el mismo se adecúa al problema analítico que se pretende resolver, y de este modo obtener resultados precisos y confiables, puesto que estos son o serán publicables en revistas indexadas, servirán para sustentar tesis, entre otros productos académicos, reduciendo también el tiempo de espera en la toma de decisiones [4].

Por todo lo anterior se considera que; tanto el análisis de información obtenida de imágenes de arreglos experimentales para la caracterización pasiva de guías de onda (es decir perdidas por acoplo), así como el procesado de imágenes de microscopia por trasmisión para calcular la zona efectiva de guiado (figura 1) (zona en la cual el índice de refracción es mayor al resto de la muestra) en guías de onda para realizar la caracterización de las mismas, representa un trabajo arduo. Actualmente, la forma de realizar los trabajos mencionados es tediosa, puesto que las herramientas utilizadas para tal fin se basan en aplicaciones programadas en Java, como plugins de ImageJ, los cuales se ejecutan y operan de forma manual para cada imagen, además que las interfaces no son amigables, lo cual distrae la tarea de centrarse en la toma de decisiones de acuerdo a los datos obtenidos [5]–[10].

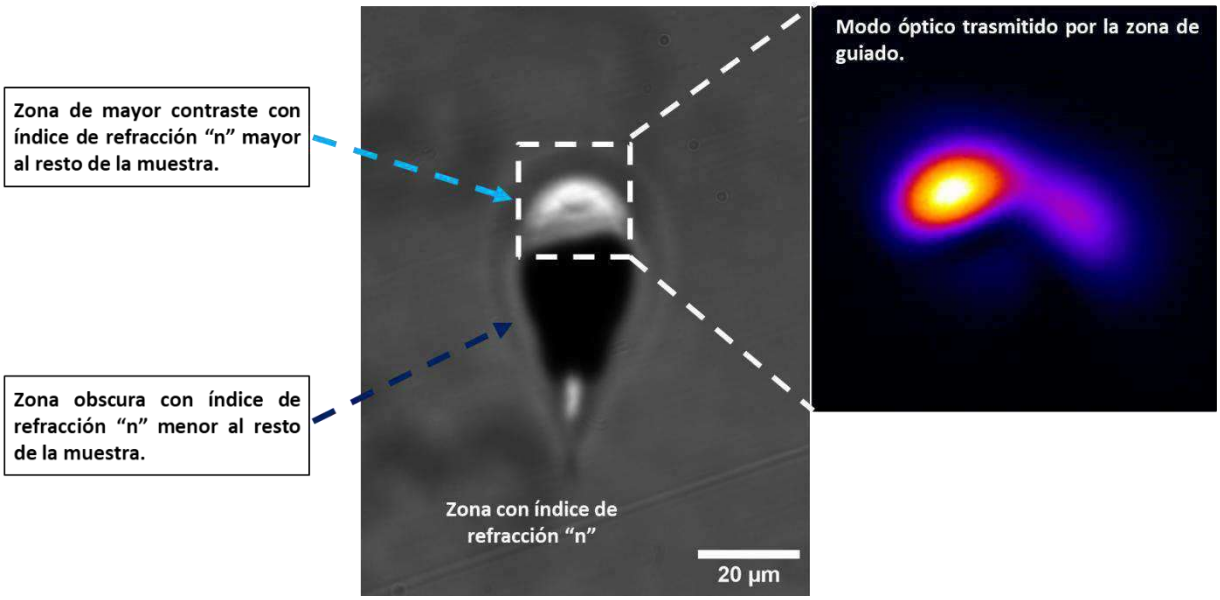


Figura 1. Imagen de microscopia por trasmisión a 100 X de amplificación, de una guía de onda con 10% de Bario, grabada a una velocidad de 60 µm/s y una energía depositada de 700 nJ, .se observa como su perfil modal, y se ejemplifican las diferentes zonas que la componen, los detalles experimentales se encuentran disponibles en la referencia [11].

Los resultados y la problemática a tratar pertenecen al laboratorio de Microprocesado de Materiales Utilizando Láseres de Pulsos Ultra Rápidos o Grupo de Procesado por Laser (GPL) del Instituto de Óptica Daza de Valdés que pertenece al Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España. El cual ha dado sus frutos, los cuales se pueden observar en las múltiples publicaciones que se han obtenido donde presentamos a la que a nuestro parecer muestran en publicaciones los resultados con los procesos que queremos mejorar, para ello revise las referencias [9], [12]–[15].

2. Problema a resolver

Para poner en contexto la importancia de este trabajo, a continuación, se describe paso a paso cómo se realizan los procesos de caracterización para el análisis de información obtenida en los laboratorios durante los procesos mencionados anteriormente.

2.1 Procedimiento actual para la caracterización de guías de onda perdidas por acoplo

En este caso las imágenes obtenidas en el arreglo experimental donde se obtienen los perfiles modales y las pérdidas por acoplo siendo el arreglo experimental el que se muestra en la Figura 2.

Para el propósito de la obtención de los perfiles modales, se dispone de tres láseres de diodo con operación a $633\ nm$, $980\ nm$ y sintonizable en el rango $1420-1640\ nm$. La señal de cualquiera de estos láseres se inyecta en la guía de ondas mediante una fibra de acoplo SMF-28, de la marca Corning. La fibra de acoplo se sitúa sobre un posicionador micrométrico de 3 ejes (X; Y; Z) mientras un sistema de imagen usando un sistema telescópico con resolución de aproximadamente $5\ \mu m$ permite aproximarla a la muestra.

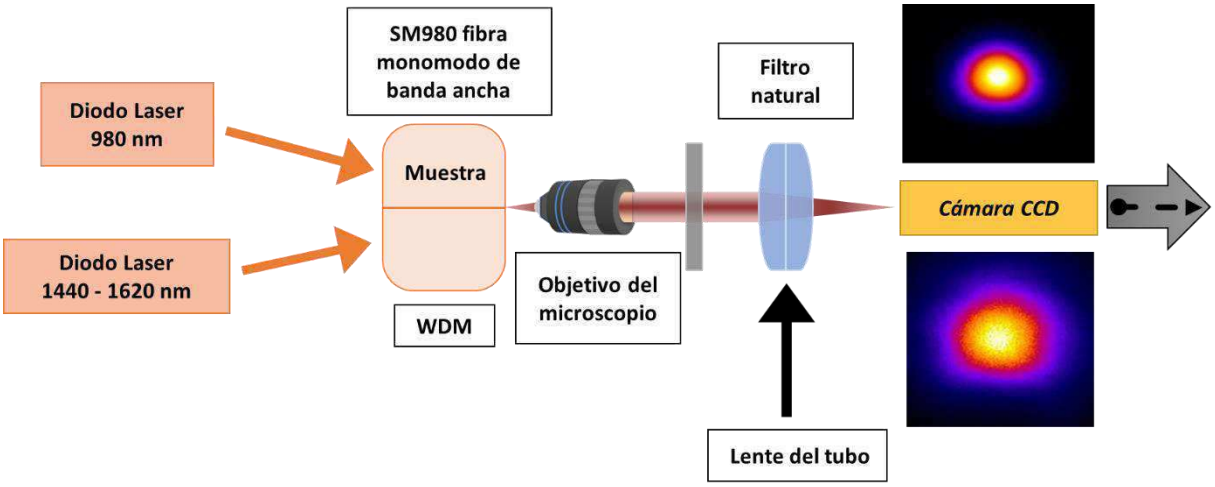


Figura 2. Arreglo experimental utilizado en la obtención de perfiles modales.

La muestra a caracterizar se coloca sobre un posicionador que permite el control angular. La muestra junto con el posicionador angular se coloca sobre un transaccional micrométrico de 2 ejes (Y; Z). De esta forma se puede enfrentar la guía a la fibra y optimizar el acoplo entre ambas. El sistema de formación de imágenes se basa en un lente de tubo de $1\ m$ de distancia focal y la detección se realiza con una cámara refrigerada Goodrich modelo **SU320-1.7** (refrigerada), que usa un sensor es de In-GaAs con un rango espectral desde 900 hasta $1700\ nm$, lo que cubre perfectamente el rango de caracterización esperado. Aquí se obtiene una matriz de información de 320×256 pixeles a 8 bits de niveles de saturación o lo que es lo mismo, se obtienen imágenes de color falso de $2^8=256$ niveles, con una resolución de $320/32\ pixeles/\mu m$, tal como se muestra en el arreglo de investigación figura 3.

Ahora bien, para procesar la imagen obtenida en el arreglo experimental que se describió anteriormente.

1. Primero se tiene que convertir con el programa de uso libre ImageJ, el archivo de datos en bruto que se encuentran en formato imagen o .img a un formato que nos permita de manera visual ver la información (es decir pasar del negativo al positivo de la imagen), dicho formato es por ejemplo el TIFF (Tagged Image File Format),

2. Una vez que se realiza esto se recorta una por una las imágenes, centrando las mismas con el punto de más alta saturación al cual llamaremos centro de masa, dejando estas imágenes en una matriz cuadrada de datos digamos por ejemplificar de $200\times200\ pxs$, este proceso se realiza debido a que para el cálculo de, esto si bien es cierto no es complicado de realizar cuando se trata de unas cuantas imágenes, se vuelve una proeza si consideramos que:

a) Por cada muestra generalmente se graban grupos de 3 guías de onda por energía las cuáles van generalmente desde los 300 a $800\ nJ$., con pasos de $50\ nJ$ lo que nos deja una muestra con 33 guías grabadas.

b) Si consideramos que para realizar la caracterización de las guías de onda por perdidas de acoplo de modos ópticos, se realiza la toma de datos a las longitudes de onda de interés en el área de las telecomunicaciones las cuáles son; 980 , 1440 , 1490 , 1534 , 1590 y $1640\ nm$ respectivamente, se tendrá en total un cumulo de 198 imágenes por cada muestra a analizar.

c) Estas 198 imágenes se tienen que recortar una por una, si consideramos que cada imagen se recorta en un tiempo de 2 minutos como mínimo, esto se vuelve un proceso tedioso, pues al menos llevaría un poco más de 6 horas y media

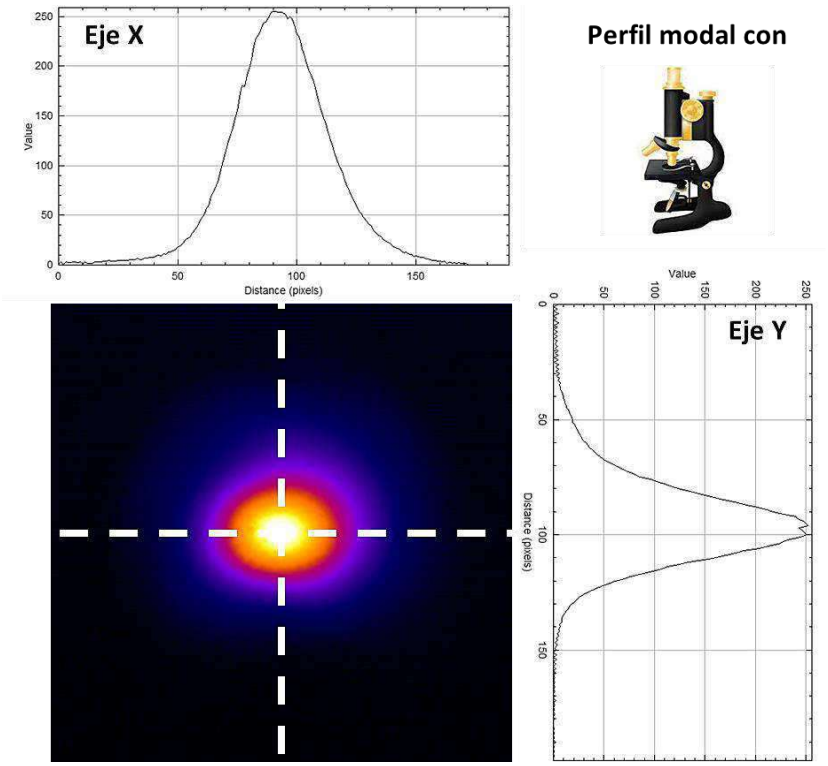


Figura 3. Perfil modal transmitido en una guía de onda grabada en una muestra de 10 % de Bario, con una energía depositada para su grabado de 550 nJ y una velocidad de escritura de 60 µm, los demás detalles experimentales se pueden consultar en la referencia [11]

Ahora bien, el problema principal de este proceso como se menciona es el tiempo que conlleva tan solo para este punto el estar recortando cada una de las imágenes.

2.2 Procedimiento actual para la caracterización de guías de onda perdidas por acoplo actual para la caracterización de guías de onda perdidas por acoplo

Para poder llevar a cabo el proceso de la determinar el área efectiva de la zona guiado en una guía de onda, el cual es el segundo problema que se plantea a resolver en este trabajo, este se realiza capturando imágenes de microscopio en modo de transmisión con una cámara de 12 bits (o $4{,}096$ niveles de intensidad) con un objetivo de microscopio que en nuestras pruebas se realizara con una amplificación de $100\ X$, ya sea en modo normal o en Microscopía de Contraste Diferencial Interferencial (ejemplos de la publicación de zonas efectivas de guiado el lector las puede encontrar en las referencias [5]–[7], [9]). Cabe hacer mención que las imágenes obtenidas aquí son de $1024 \times 1344\ pxs$, con una

resolución de $1024/65.96\ px/\mu m$, el conocer el tamaño del pixel se vuelve relevante sobre todo para saber a cuanto equivale la zona efectiva de guiado. Ahora bien, regresando al número de imágenes a analizar, esto conlleva a procesar (ocupando el ejemplo anterior) 66 imágenes de microscopia (ya que este proceso se realiza por ambas caras de la muestra). Para realizar las medidas

1. Se tira una línea en el eje de las X y se observa donde se encuentra el cambio de saturación, claro está que para esto debemos conocer o calibrar el programa con su respectiva referencia.

2. Se repite el proceso para el eje Y.

3. Se realizan las mismas medidas del otro lado de la muestra, es decir tanto de entrada como de salida.

4. Se promedian los resultados obtenidos en ambas caras, el valor de X y de Y

5. Se calcula el área de la zona de guiado, esto se puede realizar de dos maneras,

   a. **Tanto como si este fuera una media elipse**, esto es relativamente fácil, ocupando la siguiente formula.

$$A_{\text{Media Elipse}} = \frac{D_X D_Y}{8}\pi$$

Donde D_X, D_Y es el promedio de los valores en el eje de las X y Y en ambas caras de la muestra respectivamente

   b. **O como si fuera media circunferencia**, promediando todos los valores obtenidos en ambas caras con la siguiente expresión

$$A_{\text{Media Circunferencia}} = \frac{D_T^2}{8}\pi$$

Donde D_T es el promedio de los valores medidos en los eje X y Y en ambas caras de la muestra.

Como se puede observar en la figura 4, los perfiles de saturación, presenta un piso de la propia muestra que va entre los 1000 y 1500 niveles de intensidad. Por lo que, para poder obtener el área de la zona de guiado efectiva, primero se tendrán que establecer algunos criterios y que estandaricen este proceso.

Una vez terminado este proceso y con la información recabada en todos los casos, se decide que guías de onda se utilizaran ya sea como amplificadores ópticos, láseres, etc.

3. Procedimiento automatizado de filtrado y de análisis de la información obtenida en modos ópticos en guías de onda.

La principal aportación de este trabajo es explorar soluciones atractivas que permitan agilizar la toma de decisiones mediante algoritmos de fácil comprensión e implementación, que eficiente los trabajos a realizados antes, durante y después al procesado de imágenes y/o diferentes aplicaciones. Para esto se define paso a paso el procedimiento del cálculo automatizado de las perdidas por acoplo en perfiles modales, además de los correspondientes problemas que se resolvieron en el análisis y cálculo automático de la zona de guiado efectiva en guías de onda grabadas con láser de femtosegundos.

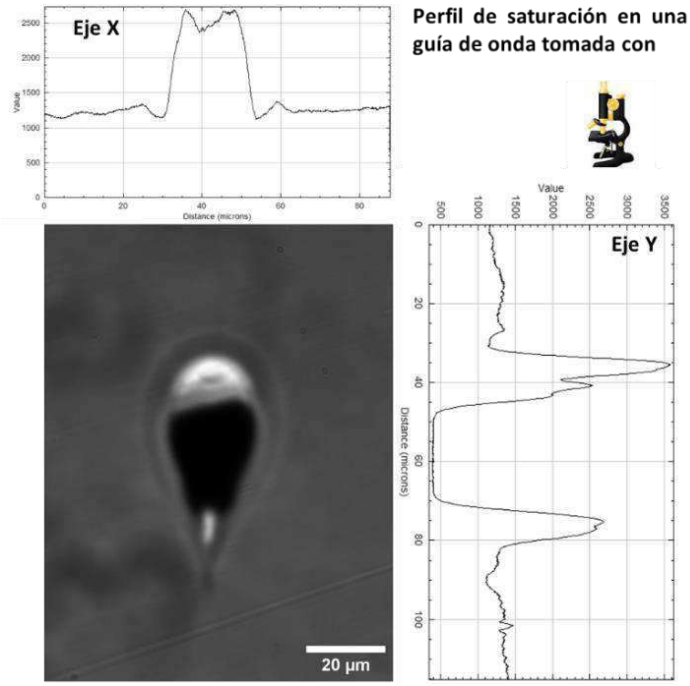


Figura 4. Imagen de Microscopia por trasmisión, en una guía grabada en una muestra de 10 % de Bario, con una energía depositada para su gravado de 700 nJ y una velocidad de escritura de 60 µm con amplificación a 100X, así como los perfiles de saturación de imagen en una cámara Nikon de 12 bits.

Es importante hacer mención que todos los algoritmos desarrollados fueron codificados en lenguaje Python [16], [17], debido a que tiene las siguientes ventajas: como primera es de uso libre, lo cual implica que no se deben realizar pagos para la obtención de licencias de uso del mismo, como segunda ventaja es un lenguaje de alto nivel y su documentación se encuentra publicada y debidamente detallada para su uso libre, y posee una variedad de librerías especializadas, las cuales facilitan el desarrollo de algoritmos para diferentes aplicaciones, como en el caso del presente estudio para el procesamiento de imágenes con aplicaciones en el análisis de guías de ondas. Las librerías Math, MatPlotlib, Numpy, OpenCV, Pillow y Scipy [17]–[22], fueron seleccionadas en base a las necesidades y a la metodología planteada para el procesamiento y análisis de imágenes de modos ópticos de guías de onda; además que los algoritmos fueron desarrollados en el entorno Jupyther Notebook.

3.1 Proceso automatizado para la caracterización de guías de onda perdidas por acoplo

Como se mencionó ateriormente, para el procesado de imágenes de modos obtenidos de guías de onda, se utilizó el lenguaje de programación Python. Las fotografías utilizadas fueron obtenidas de arreglos experimentales. Las primeras aproximaciones de este trabajo fueron explorados por los autores Ramos-De la Cruz et al en el capítulo 3 de libro Aplicaciones tecnológicas de la Ingeniería Mecatrónica y sus impactos al desarrollo socio económico a publicarse el siguiente mes [23].Las librerías utilizadas para el uso de imágenes, abstracción de datos y el procesado de las mismas se describen a continuación:

Math: La librería math cuenta con funciones de expresiones matemáticas, con las cuales no se require redactar todas las expresiones completas, si no, llamar a la función que se desee y pasar los argumentos de entrada de la misma. Se considera relevante el uso de este tipo de funciones para la limpieza y el código.

Matplotlib: Esta librería fue utilizada para la creación y visualización de los datos de las imágenes procesadas. Algunas de las ventajas de esta librería es que trabaja con estructuras de tipo arreglo

proveniente de numpy, esto es; que se pueden tener instrucciones nativas de numpy dentro de instrucciones de matplotlib.

Numpy (Numeric Python): Dicha librería se utiliza para realizar la abtracción de las imágenes en estructuras de tipo arreglo. Otra de sus ventajas son sus numerosas funciones para el trabajo y operaciones con arreglos de datos, como la identificación de valores máximos (np.max(array)) y mínimos (np.min(array)) y la sustitución de valores a partir de que se cumplan o no ciertas condiciones mediante una sintaxis muy sencilla, la anterior sirve para establecer criterios de filtrado de ruido de las imágenes.

Pillow: Dicha librería permite importar las imágenes y almacenarlas en variables para su posterior procesamiento, además que cuenta con algunas funciones relevantes para el procesamiento de datos como la conversión del modo de almacenamiento. Otra función utilizada es la función de recorte, (imagen.crop(dimensiones)), la cual se aplica a una variable de tipo imagen y se pasan como argumento las dimensiones del centro a los cuatro extremos de la misma.

OpenCV: Esta librería tiene funcionalidades similares a la librería Pillow, con la diferencia que el formato nativo para el manejo de las imágenes en esta librería sigue la convensión BGR, además que tiene funciones especializadas para el procesamiento avanzado de imágenes como el reconocimiento de patrones.

Scipy (Scientific Python): Dicha librería tiene una función muy importante para el desarrollo de los algoritmos, mediante la cual se toma como argumento un arreglo de datos para calcular la posición (fila, columna) del centro de masa de los datos. Para los efectos de cálculo del algoritmo desarrollado, se tienen distintos centros de masa, los cuales se obtuvieron de distintas imágenes antes y después de filtrar mediante ciertos criterios para la eliminación del ruido.

Cabe destacar que la tarea de recortar y filtrar datos de imágenes pareciera un trabajo sencillo, pero tiene un impacto en las horas de trabajo y en la precisión que se tendría si se trabajara de forma manual. Dicho recorte es requerido debido a que, para poder calcular las perdidas por acoplo es preferible por tiempo de cómputo y exactitud de los cálculos, tener una matriz de datos de $n \times n$ (cuadrada) y no una rectangular de $n \times m$, como son las imágenes provenientes del arreglo experimental.

La médula del procesamiento se encuentra en el filtrado de los datos de la imagen previo a su procesamiento. Para ello se definen los criterios de filtrado o discriminación de datos, para así eliminar el ruido de fondo y obtener una imagen lo más limpia posible, esto con la intensión de encontrar resultados más exactos, pues al ser una imagen experimental, la misma observa en ocasiones algunos pixeles que no alcanzan una saturación relevante y se presentan como ruido de fondo. Con esta finalidad y derivado de la teoría en distribuciones Gaussianas se implementaron dos criterios (ver figura 5);

1. El primero se basa en encontrar la zona de máxima saturación y después este valor dividirlo a la mitad, esto en la literatura se conoce como Anchura a media altura (FWHM, Full Width at Half Maximum), donde todo por debajo de este valor se hace cero, v. gr. en la cámara de 8 bits el valor máximo de saturación será 255 niveles de saturación (considerando el cero como un nivel más $2^8 = 256$ valores de saturación) figura 5

2. El segundo criterio que se presenta se le conoce como $1/e^2$, por lo que para poder aplicarlo, lo primero que hacemos es encontrar el valor de la zona de máxima saturación y a partir de este valor se multiplica por $1/e^2$, tal como se observa en la figura 5

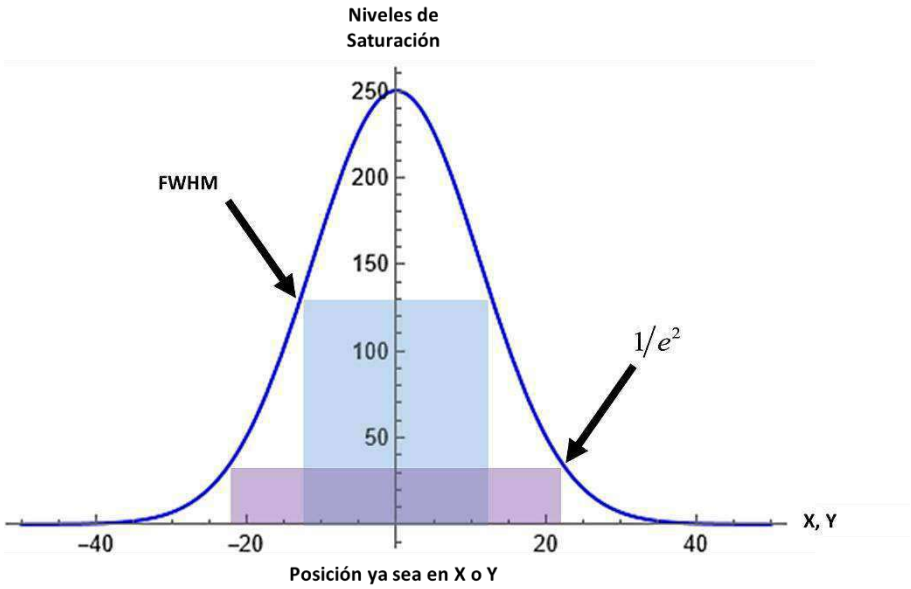


Figura 5, ejemplo de los criterios a usar, para la obtención de perfiles modales, basados en la teoría estadística.

En ambos casos se buscan y localizan las coordenadas del pixel del centro de masa de la imagen y esta se toma como referencia, para contar tanto en x y y, para después de ajustar la misma al tamaño deseado y realizar el recorte, tal como se muestra en la figura 6.

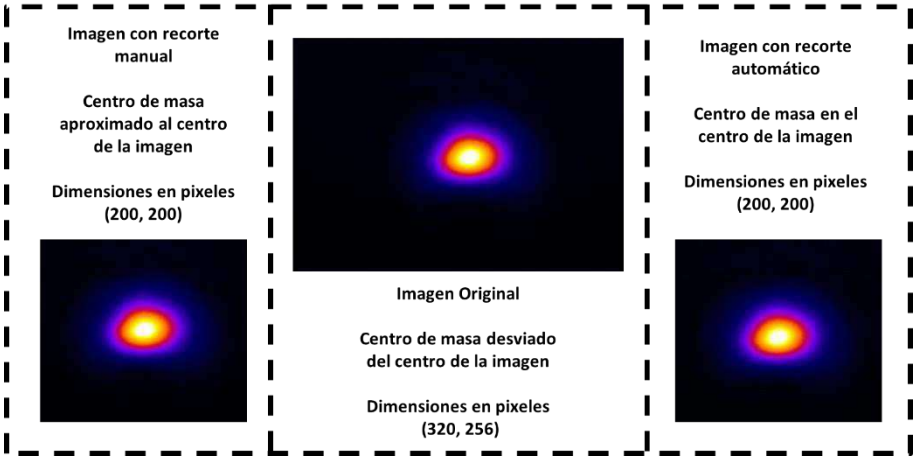


Figura 06, Perfiles modales con recorte (a) manual y (b) con recorte automático de imágenes de 320x256 a 200x200 pixeles.

Una vez recortada la imagen del modo óptico se prosigue a filtrar la imagen, eliminando todo el ruido que se encuentre a partir del centro de masa implementando los criterios antes descritos, tal como se pude apreciar en la siguiente figura 7. La intensión de filtrar estas imágenes, servirá a la toma de datos, ya que, para evitar ruido ambiental, siendo en este caso fuentes de luz externas (longitudes de onda) a la que la cámara es sensible, los datos experimentales se capturan, en un sistema con poca iluminación, por lo que el evitar esto abriría la posibilidad de realizar trabajos en mejores condiciones

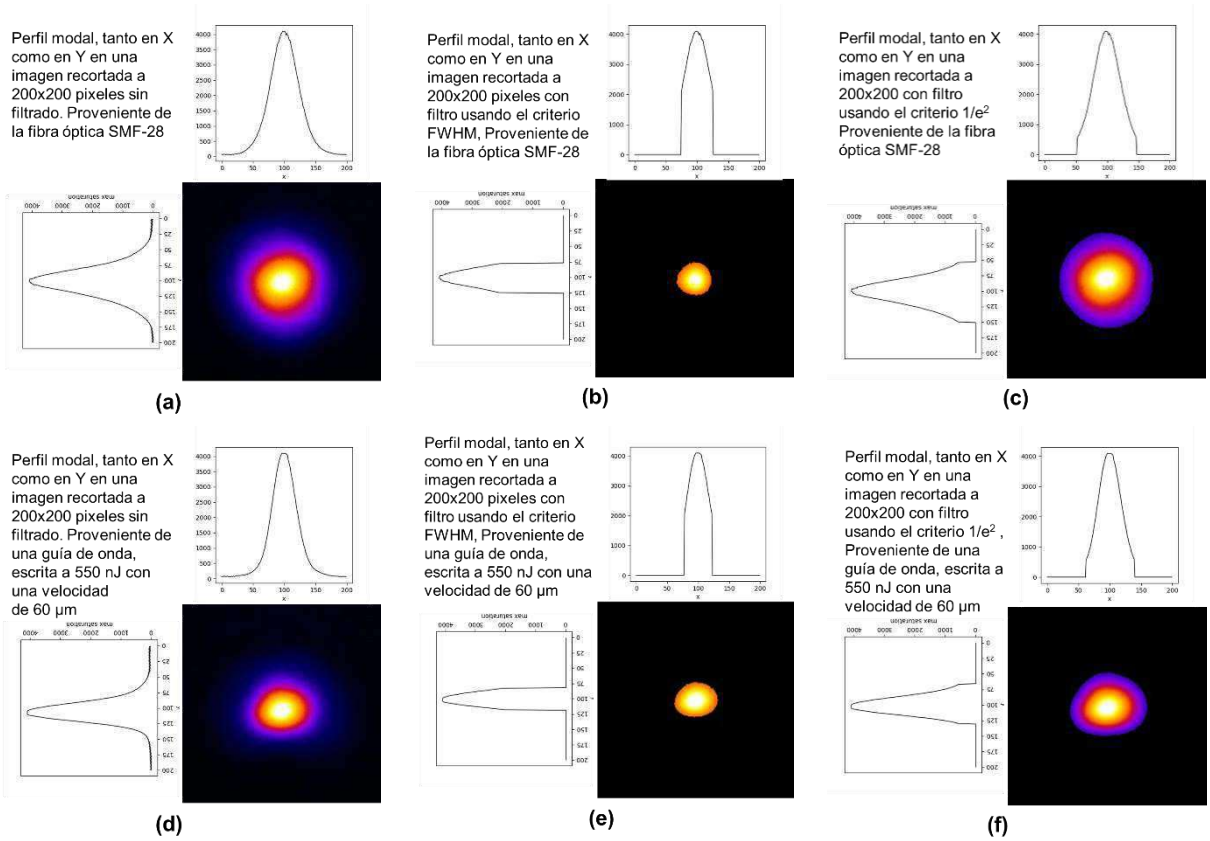


Figura 07. Modos o perfiles modales, después del filtrado de imágenes, con sus correspondientes perfiles tanto en x como en y para; (a), (d) modo recortado sin filtrar, (b), (e) modo filtrado usando el criterio HFWHM y (c), (f) usando el criterio 1/e2; proveniente de la fibra óptica SMF-28 y después de haber pasado por la guía de onda respectivamente

El paso final será el cálculo de las pérdidas por acoplo, realizando un algoritmo de convolución, comparado el tamaño del diámetro de los modos tanto en X como en Y, el primero proveniente de una fibra óptica SMF-28 (a), respecto de la que proviene con la guía de onda que se analiza (d), este cálculo se da usando la siguiente ecuación

$$CL(dB) = 10Log_{10}\frac{4a_X a_Y d_X d_Y}{\left(a_X^2 + d_Y^2\right)\left(a_X^2 + d_Y^2\right)}$$

Dado que esta es una operación de convolución derivada de integrales de intensidad, se podría pensar que al filtrar la señal el resultado final puede ser engañoso, sin embargo, esto no es cierto, ya que, si el lector recuerda, la operación definida como convolución, en realidad es una integral de comparación, por lo que al realizar esta operación se están comparando la señal inyectada, respecto de la señal de salida después de pasar por la guía de onda, se ponen al igual que todo el material anterior, a disposición los códigos realizados.

Tabla 1. Datos experimentales de perdías por acoplo en guías de onda

Guía de onda		Perdida por acoplo	
		Recorte Manual	Recorte Automático
Energía depositada 550 nJ y 60 µm/s de velocidad de grabado	(a)	0.5226	0.5958
	(b)	1.2289	1.2830
	(c)	1.1159	1.2092

4. Procesamiento de imágenes de microscopia en guías de onda

Una vez obtenida las imágenes de microscopia y se realizaron varios algoritmos de filtrado, de tal manera que la zona de fondo correspondiente a la iluminación que atraviesa la muestra, fuera eliminada, para luego utilizar realzar a la zona efectiva, a continuación, se muestran los resultados obtenidos en cada proceso

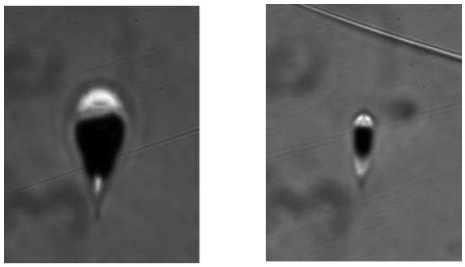
4.1 Procedimiento utilizado para el análisis de imágenes de microscopia por trasmisión para el cálculo automático de la zona de guiado

1. Importado de imágenes

Primero se importan las imágenes con la función **`Image.open()`** de la librería Pillow, a continuación, se muestra un ejemplo de la implementación de la función:

```
variable_imagen = Image.open("ruta/nombre_imagen.formato")
```

El argumento de entrada de la función (**`"ruta/nombre_imagen.formato"`**) se refiere a la ruta en la que se tiene almacenada la imagen, el nombre del archivo y su extensión. Como salida se tiene a la imagen interpretada por el editor, la cual se puede asignar a una variable (**`variable_imagen`**) y utilizarse como argumento de otras funciones. De esta forma al momento de llamar esta variable con el comando **`plt.show(variable_imagen)`** se nos mostrara la imagen cargada como aparece en la figura 8.



(a) (b)

Figura 8. Imágenes de microscopía capturadas a 60um; (a) configurada a 700nJ y (b) configurada a 550nJ

2. Abstracción de datos

Una vez que se tiene almacenada la imagen en una variable, se procede a realizar la abstracción de sus datos, que consiste en convertirla en una variable de tipo array mediante la función **`np.array()`** de la librería numpy. El argumento de dicha función es el nombre de la variable en la que previamente se almacenó a la imagen. La nueva variable creada será un arreglo de datos que, dependiendo del modo de almacenamiento de la imagen, podrá corresponder a un arreglo de $n \times m$ elementos (filas por columnas de pixeles en niveles de intensidad), o un arreglo más complejo de dimensiones $l \times n \times m$ (filas por columnas por niveles RGB). A continuación, se describe la implementación de la función:

```
imagen_array = np.array(variable_imagen)
```

Donde **`imagen_array`** es el nombre de la variable donde se guardará el arreglo de datos extraídos de la imagen mediante la funcipón **`np.array()`**, y como argumento de la función se tiene al nombre de la variable en la cual se almacenó previamente a la imagen (**`variable_imagen`**).

Dos ejemplos de cómo saber si realmente se creó la imagen en un arreglo $l \times n \times m$ es que del lado derecho de la imagen se aprecia una barra de intensidad como en la figura 9(a) y figura 10(a) (se realizaron todos los procesos en dos diferentes energías o en otras palabras para dos morfologías de

guías de onda) que sean menores que el promedio de los datos de **`variable_arreglo_2`** serán convertidos a cero.

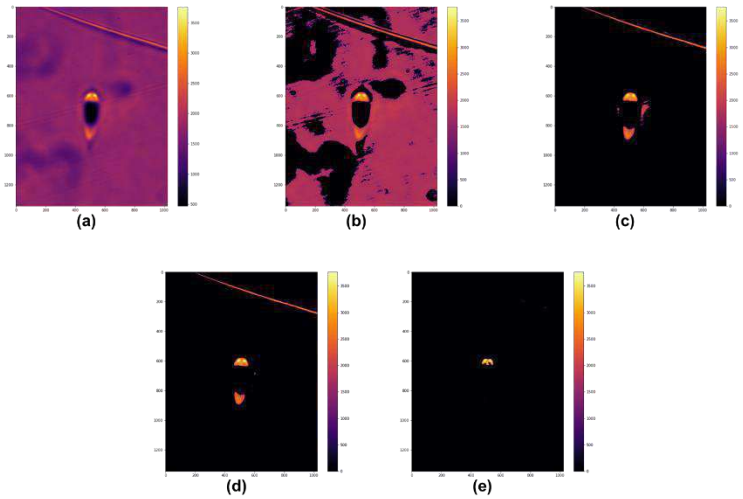


Figura 9. Imágenes resultantes después de aplicar los filtrados a la imagen de microscopía capturada a 60um y configurada a 550nJ. Donde (a) es la imagen sin filtrar, (b) usando el criterio de promedio, (c) usando el criterio 1/e2, (d) usando el criterio HFWHM y (e) usando el criterio HFWHM sumando el promedio.

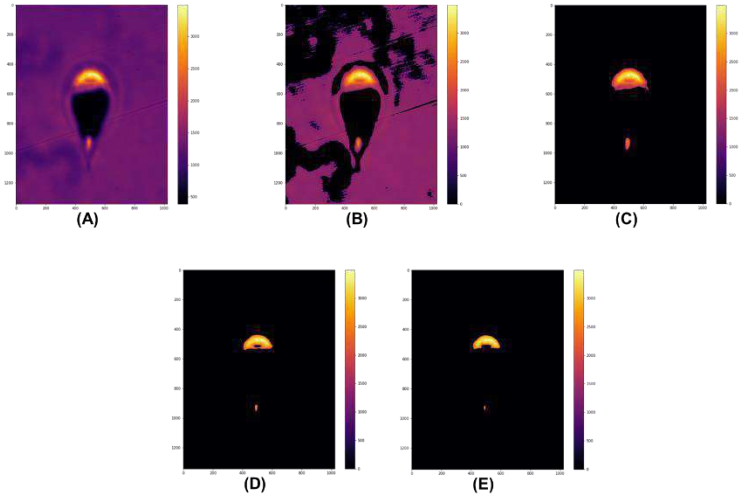


Figura 10, Imágenes resultantes después de aplicar los filtrados a la imagen de microscopía capturada a 60um y configurada a 700nJ. Donde (A) es la imagen sin filtrar, (B) usando el criterio de promedio, (C) usando el criterio 1/e2, (D) usando el criterio HFWHM y (E) usando el criterio HFWHM sumando el promedio.

3. Filtrado de imágenes.

Una vez que se realizó la abstracción de las imágenes y su almacenamiento en nuevas variables, se pueden aplicar funciones de filtrado. Para el caso de estudio, además de los dos criterios para el filtrado de ruido de fondo descritos en la sección anterior, se establecieron algunos criterios basados en los mismos con algunas modificaciones para obtener salidas que permitieran la eliminación del ruido y la identificación de las zonas de guiado, lo cual ayuda en el cálculo de ancho, alto y áreas de dicha zona. Las funciones se establecieron siguiendo la siguiente estructura:

```
arreglo[condición] = valor_deseado
```

Donde los argumentos de la función son; el arreglo o la variable que contiene los datos a los cuales se desea aplicar el filtro, una condición que discrimine o convierta a los valores del arreglo que satisfagan o no a la condición establecida, y el valor deseado con el cual se van a sustituir dichos valores. Cabe resaltar que, para operar dicha función, los valores deseados solo pueden ser datos numéricos de tipo "int" o "float", no estructuras de datos, como las listas o los arreglos. A continuación, se muestra un ejemplo sencillo de cómo declarar las funciones de filtrado:

```
variable_arreglo_1[variable_arreglo_1 < np.average(variable_arreglo_2)] = 0
```

La función anterior opera de la siguiente forma: Todos los valores de **variable_arreglo_1**

4. Cálculo de centros de masa

Debido a que en el tipo de imágenes analizadas se tienen dos zonas de guiado, en las cuales sus pixeles presentan valores de intensidad similares, se utilizan las imágenes que fueron procesadas por el criterio más agresivo para así eliminar la zona secundaria. Posteriormente se procede a realizar el cálculo del centro de masa a partir de dicha imagen filtrada (en la cual solo se tienen los datos de la zona de guiado principal) y se obtiene la posición (fila, columna) del pixel que corresponde al centro de masa de la imagen. La forma en la que se implementó el cálculo del centro de masa fue de modo tal, que se tuviera como salida una lista de 1×2 (una fila y los dos valores del centro de masa como columnas):

```
centro_masa = [round(ndimage.measurements.center_of_mass(arreglo)[0]),
               round(ndimage.measurements.center_of_mass(arreglo)[1])]
```

Donde centro_masa es el nombre de la variable tipo lista donde se almacenará el ancho y alto calculados, **round()** es una función para redondear las salidas a números enteros, **ndimage.measurements.center_of_mass()** es la función para el cálculo del centro de masa del arreglo de entrada. Al final de este proceso, se puede almacenar el centro de masa en una variable de tipo lista, la cual puede funcionó como argumento de la siguiente función.

5. Recorte de imágenes

Para la tarea del recorte se utiliza la posición del centro de masa obtenidos como se describió en la función anterior. Cabe mencionar que de los estudios realizados, y para efectos del cálculo de pérdidas por acoplo en las imágenes, se determinó que las dimensiones adecuadas para el procesado de las imágenes son cuadradas ($n\times n$), con una longitud de $200\,px$ por lado. Tomando lo anterior en cuenta el recorte se realiza mediante una función que tiene como entrada a la variable que contiene la imagen a recortar, la posición del centro de masa y la longitud de los lados, con la cual se obtiene como salida una nueva imagen ya recortada a las dimensiones deseadas, la cual puede ser almacenada en una nueva variable y abstraída a estructuras de tipo arreglo:

Primero se define una variable que contiene un valor numérico entero que corresponde a la mitad del ancho de los lados de la imagen ya recortada:

```
ancho = valor_entero
```

Posteriormente se definen los recortes hacia la izquierda, hacia la derecha, hacia arriba y hacia abajo a partir del centro de masa de la imagen. Dado que el centro de masa se almacenó en una lista de 1 fila que contiene a los dos valores de la posición, se hace referencia a ellos según sus niveles de indexación en la lista, quedando las dimensiones del recorte definidas de la siguiente forma:

```
left = centro_masa[1] - ancho
right = centro_masa[1] + ancho
up = centro_masa[0] - ancho
bottom = centro_masa[0] + ancho
```

El paso siguiente es definir una variable en la que se almacenen las dimensiones del recuadro, las cuales fueron establecidas previamente:

```
box = (left, up, right, bottom)
```

Y el paso final es aplicar el recorte mediante la función "**`imagen.crop()`**", pasando como argumento a la variable que contiene el recuadro con las dimensiones del recorte:

```
imagen_recortada = imagen.crop(box)
```

La salida de la función anterior será una nueva imagen recortada a las dimensiones especificadas en el recuadro, la cual tendrá centro en el centro de masa calculado como en la figura 11 y figura 12 (se realizaron todos los procesos en dos diferentes energías, junto con los criterios de filtrado ya aplicados)

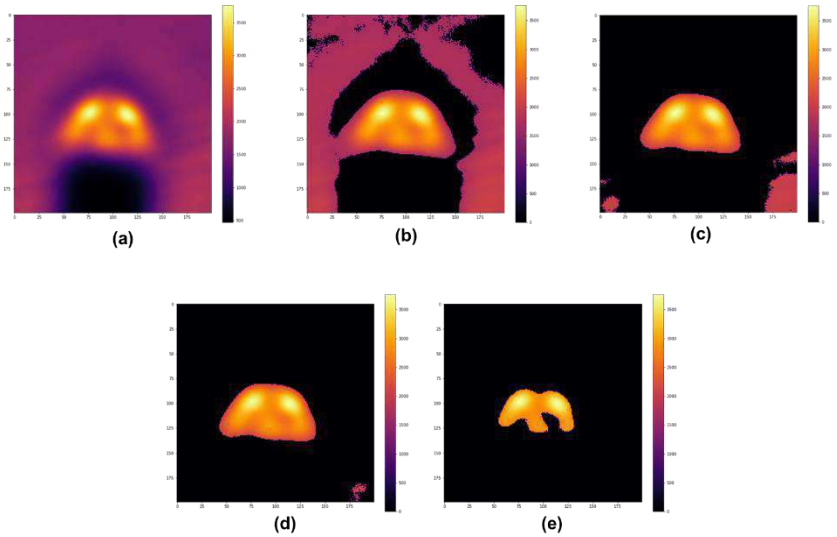


Figura 11: Recorte automático de perfil modal de microscopía, capturada a 60um y configurada a 550nJ, con centro de masa al centro de las imágenes respetando los filtrados aplicados con anterioridad.

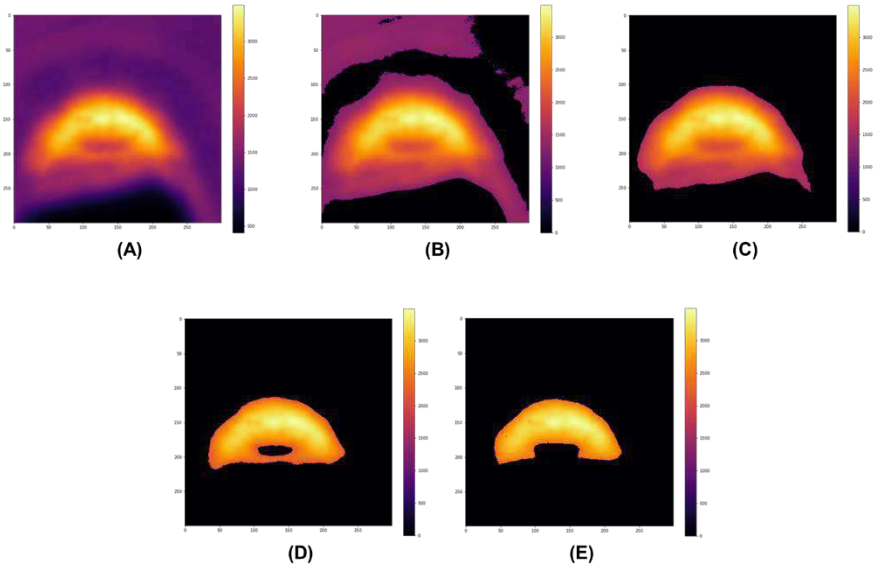


Figura 12: Recorte automático de perfil modal de microscopía, capturada a 60um y configurada a 700nJ, con centro de masa al centro de las imágenes.

6. Binarización de imágenes a valores 0 y 1

A partir de las imágenes recortadas, en las que se tiene la zona de guiado al centro de la imagen, se procede a realizar una "binarización" de los datos de la misma, lo cual consiste en aplicar una función de filtrado a los datos del arreglo para transformar todos los datos en valores ceros o unos. Se considera que en el paso anterior se ha eliminado el ruido de fondo mediante los diferentes criterios de discriminación, por lo que la función de binarización solo convertirá en uno a todo valor diferente de cero, como se describe a continuación:

```
imagen_recortada[imagen_recortada > 0] = 1
```

La salida será un nuevo arreglo con valores 0 o 1 en cada pixel, por lo que se podrá notar una zona de guiado definida tal como se muestran en las imágenes de la figura 13 y la figura 14

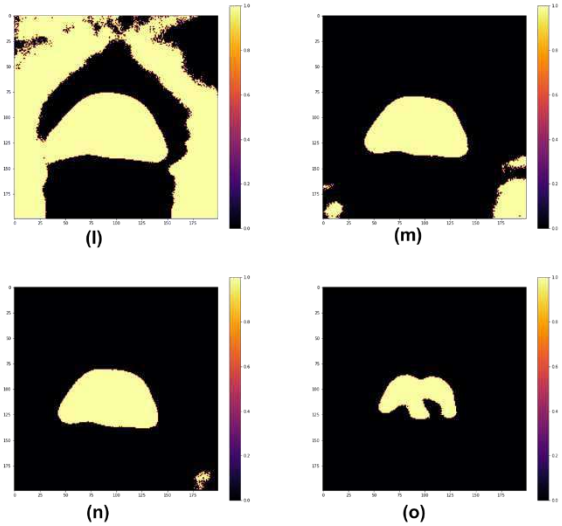


Figura 13: Binarización de imágenes capturadas a 60um y configurada a 700nJ, con centro de masa al centro de las imágenes. Donde (l) es el resultante del criterio de promedio, (m) del criterio 1/e2, (n) del criterio HFWHM y (o) usando el criterio HFWHM sumando el promedio.

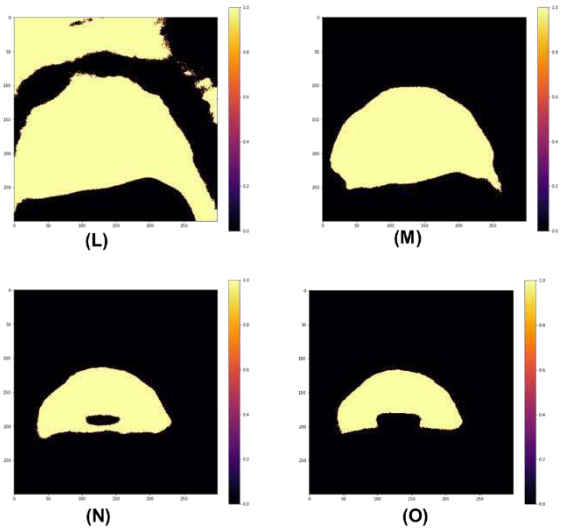


Figura 14: Binarización de imágenes capturadas a 60um y configurada a 700nJ, con centro de masa al centro de las imágenes. Donde (L) es el resultante del criterio de promedio, (M) del criterio 1/e2, (N) del criterio HFWHM y (O) del criterio HFWHM sumando el promedio.

7. Determinación de ancho y alto

Una vez que se tienen binarizados los datos de las imágenes, se procede a calcular el ancho y el alto de la zona de guiado, dichos parámetros corresponden a la suma de valores en la fila y columna que pasan por el centro de masa de la imagen procesada:

```
def ancho_alto(centro_masa, imagen_recortada):
    global ancho
    global alto
    arreglo_ ancho_alto = np.array(imagen_recortada)
    ancho = np.sum(arreglo_ ancho_alto[centro_masa[0]])
    arreglo_ ancho_alto = arreglo_ ancho_alto.T
    alto = np.sum(arreglo_ ancho_alto[centro_masa[1]])
```

La función anterior tiene como salida dos variables globales, las cuales contienen la suma de todos los valores de la fila que pasa por el centro de masa (**`ancho`**) y la suma de todos los valores de la columna que pasa por el centro de masa (**`alto`**).

8. Determinación de superficie en pixeles

Para la determinación de la superficie de la zona de guiado en valores de pixeles, se realiza una suma de todos los valores binarizados de los datos de la imagen procesada, los cuales fueron previamente abstraídos y almacenados en una variable tipo array:

```
def superficie_pixeles(arreglo):
    global superficie_pixel
    superficie_pixel = np.sum(arreglo)
```

La salida de la función anterior será una variable que contiene el valor numérico entero correspondiente a la suma de todos los elementos del arreglo de entrada (suma de pixeles de valor uno en la imagen binarizada y recortada)

9. Conversión de pixeles a micras2

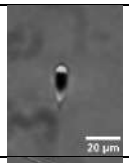
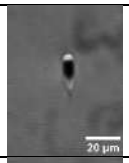
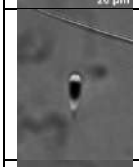
```
area_final = superficie_pixel * 0.065 * 0.065
```

Para la conversión de la superficie de pixeles a micras cuadradas se aplica la conversión descrita anteriormente. Dicha función tiene por argumento de entrada a la variable que contiene el valor numérico de la superficie en pixeles de la imagen recortada y binarizada.

Cabe destacar que la tarea de recortar imágenes pareciera un trabajo sencillo, pero tiene un impacto en las horas de trabajo y en la precisión que se tendría si se trabajara de forma manual. Dicho recorte es requerido debido a que, para poder calcular las perdidas por acoplo es preferible por tiempo de cómputo y exactitud de los cálculos, tener una matriz de datos de $n \times n$ (cuadrada) y no una rectangular de $n \times n$, como son las imágenes provenientes del arreglo experimental.

En la tabla 2 se muestra un pequeño análisis estadístico de los resultados obtenidos en el proceso descrito anteriormente, realizando una comparativa entre los cálculos hechos de manera manual y los hechos de manera automática, Las medias con el mismo subíndice en la fila no son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$). Los datos muestran la media ± desviación estándar. Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar las medidas manuales y automáticas. Las diferencias significativas entre las diferentes imágenes, las cuales se determinaron mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia de 0.05.

Tabla 2. Muestra de una tabla

	Microscopia		Área de guiado		
Guía de onda	Lado 01	Lado 02	Manual		Automática
			Media Elipse	Media Circunferencia	
Energía depositada 550 nJ y 60 µm/s de velocidad de grabado			8.3	8.5	9.8
			7.7	8.0	8.3
			8.4	8.6	7.2
Media ± Desviación estándar			8.13 ± 0.37ª	8.36 ± 0.32ª	8.43 ± 1.31ª
Energía depositada 700 nJ y 60 µm/s de velocidad de grabado			41.6	42.0	42.7
			46.8	47.1	41.0
			42.7	43.2	45.6
Media ± Desviación estándar			43.70 ± 2.74ª	44.10 ± 2.66	42.33 ± 2.28ª

5. Conclusiones

Este trabajo logra el análisis de la información experimental para procesar y optimizar el tiempo requerido para el análisis de datos y utilizar completamente esta información en la caracterización óptica de guías de onda escritas con láseres de pulso ultra corto. Esto permite obtener fundamentos más fiables en los cálculos de pérdida de acoplamiento. Además, ayuda a acelerar el tiempo de diseño y fabricación de las muestras iniciales para procesar las guías de ondas de escritura, lo que permite tomar decisiones precisas en menos tiempo a través de los cálculos computacionales. A través de esta investigación, podemos lograr una transferencia de tecnología óptima y asequible a los usuarios finales sin errores humanos.

Referencias

[1] C. Manterola, L. Grande, T. Otzen, N. García, P. Salazar, y G. Quiroz, «Confiabilidad, precisión o reproducibilidad de las mediciones. Métodos de valoración, utilidad y aplicaciones en la práctica

clínica», *Rev. Chil. Infectol.*, vol. 35, n.º 6, pp. 680-688, 2018, doi: 10.4067/S0716-10182018000600680.

[2] R. Anderson, «Directrices para la validación de métodos analíticos y la calibración del equipo utilizado para el análisis de drogas ilícitas en materiales incautados y especímenes biológicos», *Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito*, vol. 1, p. 76, 2010.

[3] M. Cuadrado Espejo, «Importancia de la Calibración en los Laboratorios de Química Analítica», Universidad de Sevilla, Sevilla, dic. 2016. [En línea]. Disponible en: https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/54518/IMPORTANCIA%20DE%20LA.pdf

[4] Organización Mundial de la Salud, *Sistema de gestión de la calidad en el laboratorio: manual*. Geneva: Organización Mundial de la Salud, 2016. Accedido: 5 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://apps.who.int/iris/handle/10665/252631

[5] T. Toney Fernandez *et al.*, «Ion migration assisted inscription of high refractive index contrast waveguides by femtosecond laser pulses in phosphate glass», *Opt. Lett.*, vol. 38, n.º 24, p. 5248, dic. 2013, doi: 10.1364/OL.38.005248.

[6] M. Macias-Montero *et al.*, «Waveguide Tapers Fabrication by Femtosecond Laser Induced Element Redistribution in Glass», *J. Light. Technol.*, vol. 38, n.º 23, pp. 6578-6583, dic. 2020, doi: 10.1109/JLT.2020.3015013.

[7] S. Thomas, T. T. Fernandez, J. Solis, P. R. Biju, y N. V. Unnikrishnan, «Optical channel waveguides written by high repetition rate femtosecond laser irradiation in Li–Zn fluoroborate glass», *J. Opt.*, vol. 47, n.º 3, pp. 412-415, sep. 2018, doi: 10.1007/s12596-018-0462-1.

[8] T. T. T. Fernandez *et al.*, «Bespoke photonic devices using ultrafast laser driven ion migration in glasses», *Prog. Mater. Sci.*, vol. 94, pp. 68-113, may 2018, doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.12.002.

[9] J. Solis, T. T. Fernandez, J. del Hoyo, J. Siegel, y P. M. Zarate, «Femtosecond-laser-induced compositional changes for high-performance photonics», *SPIE Newsroom*, pp. 8-11, nov. 2015, doi: 10.1117/2.1201511.006127.

[10] J. Del Hoyo *et al.*, «Control of waveguide properties by tuning femtosecond laser induced compositional changes», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, n.º 13, p. 131101, sep. 2014, doi: 10.1063/1.4896846.

[11] M. Macias-Montero *et al.*, «Competition Effects during Femtosecond Laser Induced Element Redistribution in Ba- and La-Migration Based Laser Written Waveguides», *Materials*, vol. 14, n.º 12, p. 3185, jun. 2021, doi: 10.3390/ma14123185.

[12] A. Dias *et al.*, «Femtosecond laser writing of photonic devices in borate glasses compositionally designed to be laser writable», *Opt. Lett.*, vol. 43, n.º 11, p. 2523, jun. 2018, doi: 10.1364/OL.43.002523.

[13] M. Macias-Montero *et al.*, «Femtosecond laser writing of refractive structures via element redistribution : Production of Ba-migration based waveguides and competition effects during element redistribution», *Materials*, pp. 1-15, 2021.

[14] P. Moreno-Zarate *et al.*, «Role of the La/K Compositional Ratio in the Properties of Waveguides Written by Fs-Laser Induced Element Redistribution in Phosphate-Based Glasses», *Materials*, vol. 13, n.º 6, p. 1275, mar. 2020, doi: 10.3390/ma13061275.

[15] P. Moreno-Zarate *et al.*, «Imaging Ellipsometry Determination of the Refractive Index Contrast and Dispersion of Channel Waveguides Inscribed by fs-Laser Induced Ion-Migration», *Phys. Status Solidi A*, vol. 215, n.º 19, p. 1800258, oct. 2018, doi: 10.1002/pssa.201800258.

[16] G. van Rossum y F. L. Drake, *The Python language reference*, Release 3.0.1 [Repr.]. en Python documentation manual / Guido van Rossum; Fred L. Drake [ed.], no. Pt. 2. Hampton, NH: Python Software Foundation, 2010.

[17] G. Van Rossum, *The Python Library Reference*. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2020.

[18] C. R. Harris *et al.*, «Array programming with NumPy», *Nature*, vol. 585, n.º 7825, pp. 357-362, sep. 2020, doi: 10.1038/s41586-020-2649-2.

[19] T. M. D. Team, «Matplotlib: Visualization with Python». Zenodo, 10 de agosto de 2023. doi: 10.5281/ZENODO.592536.

[20] P. Virtanen *et al.*, «SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python», *Nat. Methods*, vol. 17, n.º 3, Art. n.º 3, mar. 2020, doi: 10.1038/s41592-019-0686-2.

[21] G. R. Bradski y A. Kaehler, *Learning OpenCV: computer vision with the OpenCV library*, 1. ed., [Nachdr.]. en Software that sees. Beijing: O'Reilly, 2011.

[22] J. A. Clark, «Pillow (PIL Fork) Documentation», *Readthedocs*, 2015, [En línea]. Disponible en: https://buildmedia.readthedocs.org/media/pdf/pillow/latest/pillow.pdf

[23] F. C. G. Meneses, E. M. M. Torres, y T. M. Piamba, Eds., *Aplicaciones tecnológicas de la Ingeniería Mecatrónica y sus impactos al desarrollo socioe conómico*. UniMAR, 2023. [En línea]. Disponible en: http://editorial.umariana.edu.co/libros

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 22, pp. 275 – 288
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Sistema de control automático de iluminación

Hernández Hernández Arturo[1], Becerra Rodríguez María Blanca[2], Mata Donjuan Gloria Flor[1], Dublan Barragán Brenda Santa[1], Zea Pérez José Marcos[1] y Martínez Badillo Alejandro[1]

[1]Universidad Politécnica de Querétaro (UPQ)
arturo.hernandez@upq.mx
[2]Tecnológico Nacional de México/IT de Querétaro (ITQ)

Resumen

En este trabajo se desarrolló un sistema de control automático de iluminación haciendo uso de energía solar, para zonas rurales a un bajo costo. En base a las necesidades de tensión, alimentación del panel y de las baterías a usar, se realizó una investigación de sistemas de iluminación y aplicaciones para realizar el proyecto de manera eficaz y funcional. Se logró construir un regulador de carga para un sistema de iluminación solar, modificable de acuerdo a las necesidades de voltaje requeridas por el sistema de iluminación. Este regulador es funcional y adaptable para uso habitacional, con capacidad de cargar baterías de distintas tensiones sin importar si el panel solar entrega variaciones de tensión.

Palabras clave: Regulador de carga, iluminación solar, costo, panel.

1. Introducción

La energía solar constituye una fuente de energía renovable, la cual puede usarse para la generación de electricidad mediante el uso de paneles solares fotovoltaicos, que convierten la radiación solar en electricidad, haciéndola aplicables a múltiples actividades de la vida.

Estos paneles solares se fabrican hoy en módulos independientes de diversos tamaños, lo cual los hace altamente aplicables.

Adicionalmente, este tipo de energía es considerada como una tecnología limpia que no contamina y no emite CO_2 y sin importar la zona geográfica donde se encuentre la comunidad o población se puede utilizar el sistema para la captación de energía solar.

Existe un estudio donde la planificación del sistema solar fotovoltaico (FV) requiere un proceso de toma de decisiones estratégicas de criterios múltiples (MCDM), que sea flexible para la toma de decisiones del gobierno basados en factores cualitativos y cuantitativos. El MCDM de dos etapas que integra el proceso de jerarquía analítica (AHP) y los métodos de análisis multiplicativo de relación de objetivos múltiples (MULTIMOORA) en el entorno de Interval Valued Pythagorean Fuzzy (IVPF) se aplica para seleccionar el fabricante de paneles solares para la zona de Turquía. El resultado sobre el análisis de sensibilidad y análisis comparativo para demostrar la solidez y verificación de los resultados (Sukran, 2020).

En otra investigación se muestra un gran interés en la inversión en el potencial reciclaje de paneles solares, lo que está generando demanda y la necesidad de desarrollar políticas que regulen las responsabilidades de las partes interesadas (Majewski, 2021).

En este trabajo se describe un conjunto de criterios experimentales implementados para examinar la influencia de la escala geométrica en las presiones inducidas por el viento en los paneles solares

montados en el techo. Teniendo en cuenta el tamaño de los modelos de túnel de viento (Alraswashdeh, 2020).

Otra investigación informa que existen varios tipos de paneles solares hechos de aluminio, vidrio, plata, etileno-acetato de vinilo, plomo, cromo y cadmio. Estos materiales pueden causar cáncer y contaminación ambiental (Jayapradha, 2020).

En Sudáfrica quieren fabricar paneles solares los cuales están eliminando gradualmente la economía del carbón (Semelane, 2020).

En otro trabajo se describen el modelo de los paneles solares el cual se centra en estimar con precisión la producción de energía de los paneles, mientras que el modelo de las baterías se basa en la tasa de energía descargada como parámetro principal/de control en lugar de la tasa de amperios*hora descargada/carga (Porras, 2021).

2. Funcionamiento básico de un regulador de carga solar

El regulador de cara solar se coloca entre el panel solar y las baterías, es el encargado de controlar el flujo de energía que circula entre ambos componentes. Este control de flujo de energía se realiza mediante el control de los parámetros de intensidad (I) y voltaje (V) que son inyectados a la batería, todo esto depende también del estado de carga de dichas baterías y de la energía generada por el panel solar. La principal función del regulador es controlar constantemente el estado de carga de las baterías para hacer un llenado óptimo y así alargar su vida útil, como se muestra en la Figura 1.

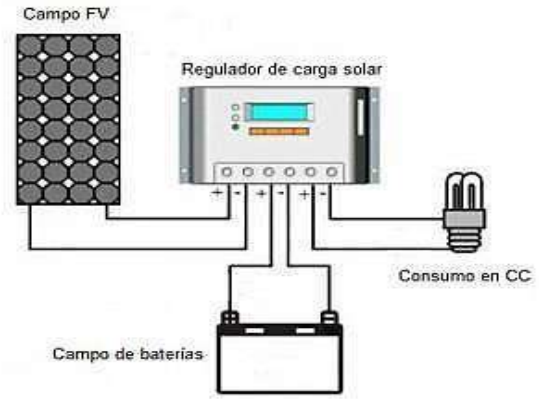


Figura 1. Conexión de un sistema de carga solar.
Monsolar, 2020, recuperado 19/09/2023 https://www.monsolar.com/blog/que-es-y-que-hace-un-regulador-de-carga-solar/

2.1 Estados de carga posibles

2.2 2.1 Estados de carga posibles

Existen tres tipos de cargas posibles para las baterías:

- Fase BULK: en esta fase la batería esta descargada y toda la corriente producida por el panel solar es inyectada a las baterías aumentando la tensión poco a poco hasta que se vaya llenando.

- Fase ABSORCIÓN: en esta fase el regulador mantiene la tensión por debajo del voltaje de absorción de la batería, este valor depende del tipo de batería a usar.

- Fase de FLOTACIÓN: en esta fase la tensión se reduce aún más hasta la tensión de flotación y la corriente inyectada disminuye hasta llenar la batería por completo.

2.3 Regulador PWM

Los reguladores PWM (Pulse width modulation, Modulación por ancho de pulso), son los encargados de cargar las baterías por medio de un algoritmo previamente programado, limitando la corriente de carga hacia la batería dependiendo del estado de carga de la misma. Estos reguladores son capaces de cargar completamente las baterías gracias a que va introduciendo la carga de forma gradual en las baterías. Esto se logra con los pulsos del PWM permitiendo que la carga de la tensión se haga de manera óptima y estable, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Regulador PWM.
Solar, 2018, recuperado 19/09/2023, https://solarymas.com/producto/regulador-10-amperios-para-sistemas-12v-o-24v/

2.4 Reguladores MPPT

Los reguladores MPPT (Maximum power poin tracking, Seguidor punto de máxima potencia), este regulador tiene la capacidad de independizar la tensión de funcionamiento de los paneles solares de la tensión de la batería, por lo tanto, al no depender de la tensión de la batería el regulador puede variar la tensión de funcionamiento de los paneles solares comprobando en cada momento cual es el punto en el que el panel entrega la máxima potencia posible, como se ve en la Figura 3.

Figura 3. Regulador MPPT.
El consultor solar, 2023, recuperado 19/09/2023, https://elconsultorsolar.com/como-funciona-un-regulador-mppt/

2.5 Convertidor Buck-Boost

Un convertidor Buck-Boost es un suministro de energía de modo conmutado que concentra aun convertidor Buck y uno Boost en un solo circuito. La finalidad de estos circuitos es el recibir una tensión CC de entrada y obtener a la salida una tensión CC diferente ya sea mayor o menor a la de entrada, según sea como se requiera. La Figura 4, muestra un circuito Buck-Boost de 4 conmutadores dos son MOSFFET y dos son diodos. Cuenta también con una unidad de control que generalmente es PWM la cual dependiendo el ancho de pulso es la tensión a la salida.

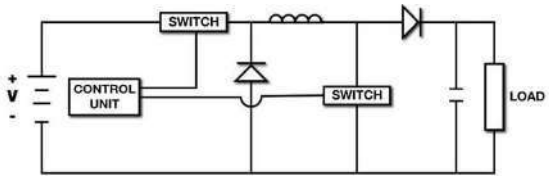


Figura 4. Circuito Buck-Boost. Arrow, 2017, recuperado 19/09/2023, https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/buck-boost-converters-the-versatile-voltage-component

2.6 Fórmulas para el diseño del convertidor Buck-Boost

En la Figura 5, se puede ver el diagrama del circuito convertidor (Erickson, 2001) con las ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (5) respectivamente.

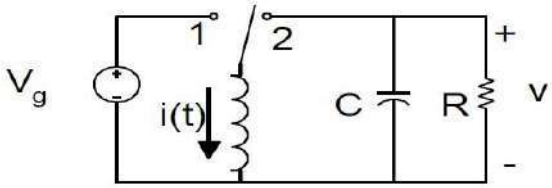


Figura 5. Convertidor DC-DD.

La relación de voltajes M(D) como se muestra en la ecuación 1 contra D (ciclo útil) se puede graficar, donde se puede apreciar que a medida que el ciclo útil sube la relación M(D) sube un valor absoluto

$$M(D)=V/Vg \tag{1}$$

En el convertidor también es importante considerar la ley de Ohm que es la relación entre la tensión (V), corriente (I) y resistencia (R) en un circuito eléctrico como se muestra en la ecuación (2):

$$R=Vo/Io \tag{2}$$

La inductancia (L) es la capacidad de almacenar energía en forma de campo magnético cuando se aplica una corriente eléctrica, es la propiedad de un circuito eléctrico para resistir al cambio de corriente y se calcula con la ecuación (3).

$$L=(Vg*D)/(fs*2*RI) \tag{3}$$

La capacitancia (C) la cual relaciona la carga eléctrica de cada conductor y la diferencia de potencial, representa la capacidad de almacenar carga eléctrica por unidad de voltaje, como se muestra en la ecuación (4).

$$C=(Vo*D)/(2*RV*fs*R) \tag{4}$$

3. Metodología

3.1 1er. Etapa: Diseño de convertidor DC-DC Buck-Boost

En la primera etapa del proyecto se realizó una investigación sobre el funcionamiento y distintos tipos de los reguladores de carga solar y sus diagramas eléctricos. Así mismo se investigaron los tipos de convertidores DC-DC para determinar el más conveniente para la realización del proyecto. El convertidor DC-DC que se seleccionó fue el convertidor Buck-Boost ya que este convertidor permite una mayor tensión de salida y una menor tensión de salida a la tensión de entrada con lo cual cumpliría

con uno de los objetivos del controlador.Una vez realizada la investigación se definieron los parámetros de diseño para el controlador de carga solar. Estos parámetros se muestran en la Tabla 1.

Una vez definida las especificaciones del controlador se procedió a calcular los valores de los componentes principales del convertidor.

Los resultados descritos en la Tabla 2 son los obtenidos por la programación en MATLAB de la ecuación (1) para calcular el ciclo útil del PWM y dé una tensión de 30v en la salida del convertidor DC-DC Buck-Boost.

Tabla 1. Especificaciones.

Especificaciones	Valores	Unidades
Máxima tensión de entrada (Vg)	17.5	V
Mínima tensión de entrada (Vgm)	12	V
Tensión de salida (Vo)	30	V
Máxima corriente de salida	14	A
Potencia de salida	420	W

Tabla 2. Ciclo útil.

Datos	Resultado	Unidades
M(D)	-2.5	
D	0.7143	

En la Tabla 3 se muestran los resultados de la resistencia, inductancia y la capacitancia obtenidos por las ecuaciones (2), (3) y (4) programadas en MATLAB.

Tabla 3. Valores R, L y C.

Datos	Resultados	Unidades
R	2.1429	Ohms
L	85.7	uH
C	250	uF

Para calcular la frecuencia a la cual trabajará el PWM del convertidor se utilizaron las fórmulas obtenidas en el datasheet del microcontrolador PIC18F4550.

$$T = \frac{1}{Freal} \tag{5}$$

$$Tcristal = \frac{1}{Fcristal} \tag{6}$$

$$X = \left(\frac{T}{PT*4*1*Tcristal}\right) - 1 \tag{7}$$

Fuente: Datasheet PIC18F4550

En la Tabla 4 se muestran los parámetros de diseño para obtener la frecuencia de trabajo requerida del PWM en el microcontrolador: Fcristal (frecuencia de oscilación que genera una señal eléctrica con una frecuencia precisa y estable), Freal (fecuencia real operativa del PWM) y PT (periodo de tiempo, el cual es la duración total del ciclo completo de una señal PWM).

Tabla 4. Parámetros para la frecuencia PWM.

Parámetros	Valores	Unidades

Fcristal	48000000	MHz
Freal	100000	Hz
PT	1	

En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos de las ecuaciones (5) el cual representa el tiempo que es de 0.01 milisegundos, (6) representa el tiempo relacionado con las operaciones efectuadas por el oscilador de cristal y (7) que representa el valor de X se ingresa en la programación del microcontrolador y así obtener los 100000 Hz en el PWM programadas en MATLAB.

Tabla 5. Valores para el microcontrolador.

Datos	Resultados	Unidades
T	0.01	ms
Tcristal	0.00002	ms
X	119	

3.2 Selección de la carga y batería

La batería que se seleccionó es la batería CALE-SOLAR de 12V 122ah ciclado profundo ya que esta batería está diseñada especialmente para sistemas de carga solar soportando un alto número de ciclos de vida sin afectar su desempeño, como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Batería CALE-SOLAR. Master, 2023, recuperado 19/09/2023, https://www.amazon.com.mx/Master-Profundo-Operacion-Capacidad-Corriente/dp/B0B726HLYR/ref=cm_cr_arp_d_pl_foot_top?ie=UTF8

La carga que se seleccionó es el sistema de luces Foco proyector LED IP65 10W 850Lm 12-24VDC ya que aporta una iluminación equivalente a una bombilla incandescente de 60W, lo cual va a generar la cantidad de iluminación requerida, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Foco Proyector LED IP65 10W 850Lm 12-24VDC. Hyperled, 2023, recuperado 19/09/2023, https://hyperled.es/proyectores-de-leds-para-exterior-12-y-24vdc/comprar-foco-proyector-led-50w-4-250lm-ip65-12-24vdc-jwsfl501224-led-308--8435402506034.html

En la Tabla 6 se muestran los cálculos para saber cuánto tiempo durará en descargarse la batería con esa carga sin dejar que se descargue por completo.

Tabla 6. Cálculos de la batería.

Datos	Valores	Unidades
Voltaje de la batería (V)	12	V
Amperes hora (A)	122	A
Hora(h)	100	h
Potencia del foco (Wf)	10	W
Intensidad nominal (Inb)	1.22	A
Potencia de la batería (Wb)	14.6	W
Kilo watts hora (kWh)	1.46	kWh
Tiempo de descarga completa	146	h
Tiempo real de descarga	48	h

3.3 2da. Etapa: Diseño de control PID

En la segunda etapa del proyecto se desarrollaron los diagramas eléctricos en simulación, se obtuvo la función de transferencia del convertidor DC-DC Buck-Boost así como los valores del controlador PID para lograr un correcto control del mismo y así como la programación con la cual se logró controlar la carga de las baterías y el encendido del sistema de luces de manera automática cumpliendo con el objetivo del proyecto. Con el programa MATLAB y su herramienta Simulink se logró diseñar el circuito del convertidor DC-DC Buck-Boost como se muestra en la Figura 8, en esta simulación se le ingresaron los parámetros ya calculados que fueron: ciclo útil (D), mínima tensión de entrada (Vgm), inductancia (L), capacitancia (C) y el periodo del PWM (T), para el valor de la capacitancia se seleccionó valores comerciales cambiando los 250uF por un capacitor de 220uF, según la Figura 8.

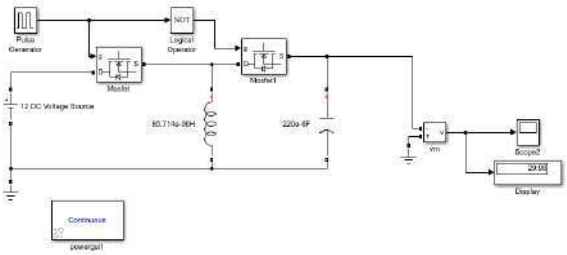


Figura 8. Diseño en SIMULINK. Fuente propia.

Como se podrá notar en la Figura 9 se obtuvo la respuesta transitoria del convertidor llegando a la tensión de salida (Vo) que se planteó en los parámetros de diseño que es 30v, también se puede notar que se obtiene un sobre impulso muy alto lo cual no es conveniente para las baterías y es necesario eliminar agregándole un controlador PID.

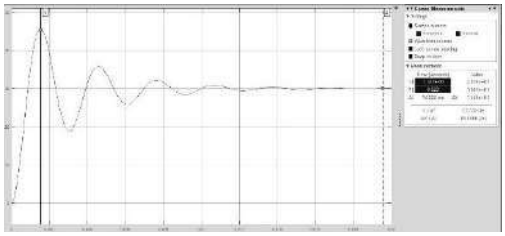


Figura 9: Respuesta transitoria. Fuente propia.

Para calcular el controlador PID se obtuvo el modelo matemático de la planta (función de transferencia) analizando la respuesta transitoria y aplicando las siguientes formulas.

En la ecuación (8) se muestra la ecuación de transferencia G(s) la cual describe la relación entre la salida y la entrada de un sistema dinámico en el dominio de la Laplace.

$$G(s) = \frac{K*Wo^2}{s^2+(2*\zeta*Wo)+Wo^2} \tag{8}$$

En la ecuación (9) se muestra la ganancia del sistema K la cual se usa para ajustar la magnitud de la respuesta del sistema.

$$K = \frac{ks}{h} \tag{9}$$

En la ecuación (10) y la ecuación (11) representan el amortiguamiento relativo, donde ζ está relacionado con el factor de amortiguamiento y afecta la estabilidad y la forma de respuesta transitoria del sistema.

$$d = \frac{b}{a} \tag{10}$$

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2*\pi}{\ln(d)}\right)^2+1}} \tag{11}$$

En la ecuación (12) representa la frecuencia a la que oscila el sistema si no hubiera amortiguamiento.

$$Wo = \frac{2*\pi}{To*\sqrt{1-(\zeta)^2}} \tag{12}$$

En la Tabla 7 se muestra los valores obtenidos de la respuesta transitoria para posteriormente utilizar las ecuaciones desde la ecuación (8) hasta la ecuación (12), donde ks representa la ganancia del sistema en voltios, h representa la tensión de entrada en voltios, a y b son parámetros utilizados para calcular d y ζ y To es el tiempo que tarda el sistema en alcanzar aproximadamente el 63.2% de su valor final.

Tabla 7. Datos obtenidos de la respuesta transitoria.

Datos	valores	Unidades
ks	11.7	V
h	12	V
a	4.47	V
b	0.65	V
To	5.643x10^-3	s

En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos de las ecuaciones (8) hasta la ecuación (12) así obteniendo el modelo matemático del sistema.

Tabla 8.Cálculo del modelo matemático.

Datos	Resultados	Unidades
K	0.978	V
d	0.154	V
ζ	0.2934	
Wo	1164.7067	
G(s)	$G(s) = \frac{1326697.78}{s^2+683.4498s+1356541.697}$	

Una vez obtenido el modelo matemático de la planta (función de transferencia) con ayuda del comando en MATLAB PIDtools se logró calcular los valores Kp (corresponde a la ganancia proporcional), Ki (es la ganancia integral) y Kd (es la ganancia derivativa) para el controlador PID los cuales se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores Kp, Ki y Kd para el controlador PID.

Datos	Resultados
Kp	0.017605
Ki	34.9153
Kd	2.2191e-06

Al obtener los valores Kp, Ki y Kd se agregó el controlador PID en la simulación en la herramienta Simulink de MATLAB obteniendo como resultado una respuesta transitoria del sistema más estable y sin sobre impulsos con un error muy cercano a 0. Como se muestra en la Figura 10 y Figura 11.

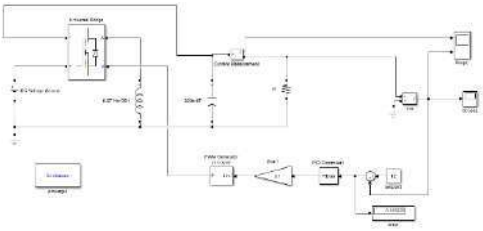


Figura 10. Control PID. Fuente propia.

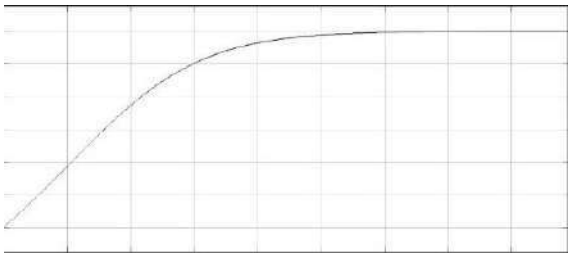


Figura 11. Respuesta transitoria con control PID implementado. Fuente propia.

3.4 Desarrollo de algoritmo PIC18f4550

Ya corroborado el funcionamiento del controlador PID se prosiguió a el desarrollo del algoritmo en el programa PIC C COMPILER para el correcto control del circuito. El microcontrolador que se selecciono es el PIC18F4550 ya que contiene lo indispensable para el proyecto. En el algoritmo del microcontrolador a utilizar, se agregan los fusibles necesarios para el funcionamiento del microcontrolador, se indica la resolución del convertidor ADC que es de 10 bits, se agrega el tipo de reloj a utilizar 48MHz, se agrega la comunicación serial rs232, se agregan las librerías como “string”, “stdlib” y “ds1307” se declaran las variables globales a utilizar, se agrega la interrupción por puerto serial la cual adentro se incorpora un switch case el cual es el encargado de guardar los valores recibidos por el puerto serial en las distintas variables, después se agrega una función que es la encargada de leer los sensores de tensión por los puertos ADC del microcontrolador y los manda por el puerto serial, en el código principal se inicializan las configuraciones para el PWM, para la lectura del ADC y para las interrupciones por puerto serial, después sigue el ciclo infinito en el cual se incorpora el controlador PID el cual varía el PWM haciendo que el convertidor cargue las baterías con la tensión requerida, por último se agrega otro ciclo infinito el cual activa el sistema de iluminación cuando el panel solar no esté entregando voltaje lo cual sería en la noche y se desactiva la carga dependiendo la hora que se seleccione.

3.5 Diseño de la interfaz gráfica en pantalla NEXTION

Después se prosiguió con el diseño de la interfaz gráfica con la cual el usuario va a interactuar con el regulador de carga solar, en esta interfaz el usuario va poder ver el estado de carga de la batería, así como la tensión suministrada por el panel solar, va a poder cambiar los parámetros predeterminados ajustándolos a sus tipos de baterías y la hora que quiera utilizar. En la Figura 12 se observa la primera página que es la caratula de inicio de la pantalla NEXTION.

Figura 12. Caratula de inicio. Fuente propia.

En la Figura 13 se muestra la página en la cual el usuario va a poder modificar los parámetros tanto de la máxima tensión de carga de la batería, así como la mínima tensión de carga a la cual va a poder llegar la batería para volverse activar la carga, también va a poder seleccionar el tiempo que quiera que el sistema de luces permanezca encendido durante la noche así mismo cuando quiera que se desactive por motivo de una descarga inesperada.

Figura 13. Configuración de parámetros. Fuente propia.

En la Figura 14 el usuario va poder visualizar la carga actual del batería así mismo la tensión que está suministrando el panel solar además de activar el sistema de iluminación por medio de un botón a cualquier hora del día, activando la carga, además de otro botón que le permitirá cambiar de nuevo los parámetros además de unas flechas las cuales se pondrán de rojo cuando el panel este cargando la batería y de negro cuando no y también cuando este activa la carga.

Figura 14. Visualización de tensiones. Fuente propia.

En la Figura 15 se muestra la página la cual contiene un teclado el cual el usuario va a poder utilizar para guardar los valores y enviarlos por el puerto serial al microcontrolador.

Figura 15. Teclado para envío de datos. Fuente propia.

3.6 3era. Etapa: Diseño de esquemático

Se desarrollaron los esquemas del sistema eléctrico, así como el PCB que contiene todos los componentes electrónicos para el correcto funcionamiento del regulador de carga solar, todo esto con ayuda del programa de diseño SOLIDWORKS PCB. Para poder hacer el esquemático se tuvo que descargar un programa llamado LIBRARY LOADER el cual permite descargar las librerías de los componentes que no se encuentran por default en SolidWorks PCB, estas librerías contienen el esquemático y el PCB del componente, así como algunas su modelo 3D, el programa se puede observar en la Figura 16.

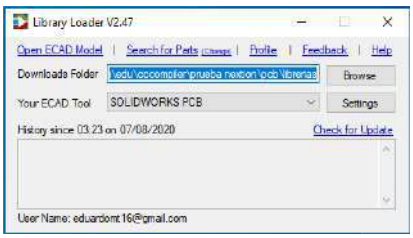


Figura 16. Library loader. Fuente propia.

En la Figura 17 se puede observar el diseño del esquemático del regulador de carga, se agregaron todos los componentes necesarios para el correcto funcionamiento, así como texto para la fácil lectura del diagrama.

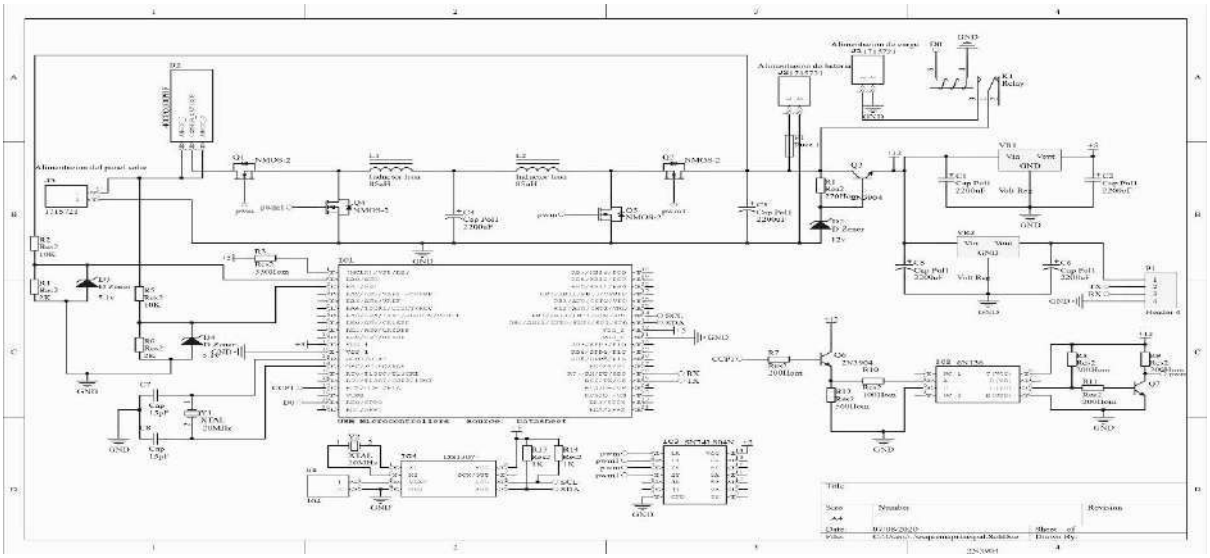


Figura17. Esquemático SolidWork PCB. Fuente propia.

En la Figura 18 se observa la PCB ya terminada con su ruteo de pistas, los componentes agregados de la mejor manera para ahorrar más espacio posible, acomodando los conectores de un solo lado para mayor practicidad, este diseño de PCB es de dos capas ya que el tener tantos componentes es necesario tener más de una capa para no cruzar conexiones, también se agregaron texto para la señalización de las entradas y salidas.

3.7 4ta. Etapa: Pruebas

Se hicieron las pruebas necesarias del proyecto de manera simulada para corroborar el correcto funcionamiento del diseño. (Debido a la contingencia no se logró construir el prototipo). La simulación se llevó acabo con el programa de PROTEUS, se armó el circuito y con ayuda de un programa llamado

Configure virtual serial port driver se logró generar 2 puertos virtuales para lograr conectar el programa de PROTEUS con el programa de NEXTION EDITOR para hacer la comunicación serial y poder enviar y recibir los datos y observar que todo funcionara de manera correcta. En la Figura 19 se logra ver el programa Configure virtual serial port driver que se utilizó para los puertos virtuales.

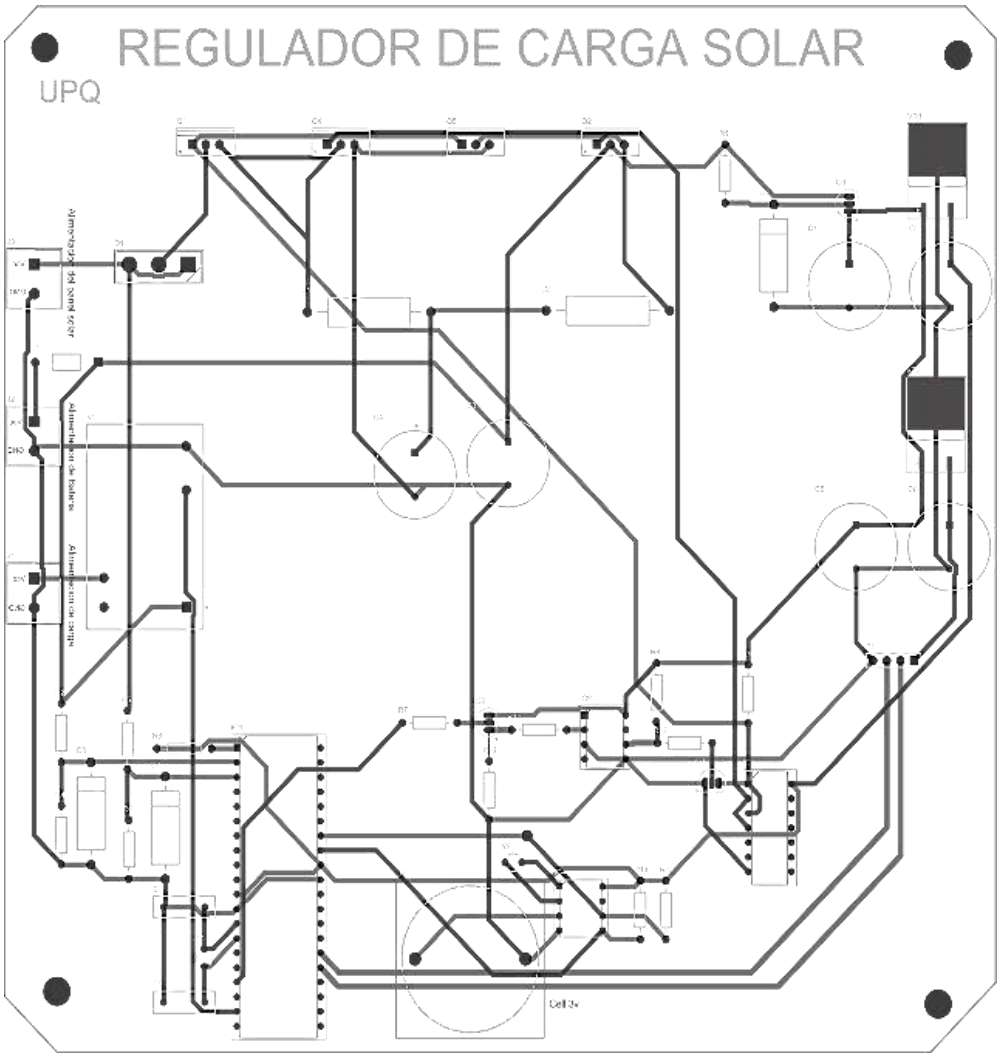


Figura 18. PCB regulador de carga. Fuente propia.

Figura 19. Configure virtual serial port driver. Fuente propia.

En la Figura 20 se observa la simulación que se realizó en PROTEUS para probar la programación, el funcionamiento del controlador PID y la correcta transmisión y recepción de datos por el puerto serial, así mismo para probar que la interfaz gráfica funcionará correctamente.

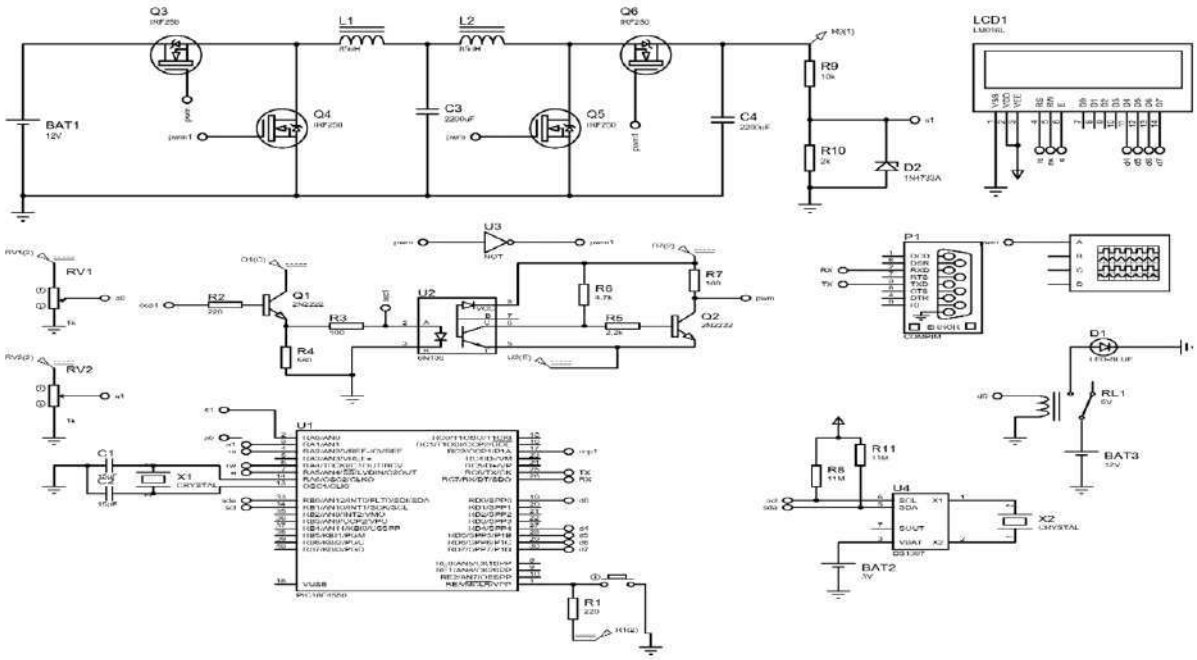


Figura 20. Esquemático PROTEUS. Fuente propia.

4. Resultados

Este trabajo tuvo como objetivo realizar la investigación, análisis, diseño y programación la creación de un regulador de carga solar para un sistema de luces leds, el cual debe cargar las baterías de un modo eficiente y sin importar si es de mayor o menor tensión a la entregada por el panel solar, también controlar el encendido y apagado del sistema de luces.

Se investigaron las necesidades de carga de la batería acuerdo a lo requerido para hogares en zonas rurales, así mismo también se investigó la carga que se colocaría para saber cuánto tiempo duraría en descargarse la batería seleccionada. Con la finalidad de identificar los componentes adecuados para cumplir el objetivo se seleccionó como circuito principal el convertidor DC-DC Buck-Boost, se calcularon los valores de los componentes electrónicos del convertidor DC-DC para cumplir con los parámetros de diseños ya establecidos.

Una vez obtenido el diseño del convertidor se procedió a obtener el controlador PID para obtener una respuesta estable del convertidor, para lograrlo primero se obtuvo el modelo de la planta por medio de cálculos, una vez capturados el modelo de la planta (función de transferencia) con la herramienta de MATLAB PIDtool se obtuvieron los valores del controlador PID.

Se realizaron pruebas del controlador para verificar el correcto funcionamiento obteniendo resultados satisfactorios. Se prosiguió a hacer el algoritmo del microcontrolador y la interfaz gráfica en la pantalla NEXTION, los cuales son los encargados de controlar la carga de la batería y el accionamiento del sistema de luces, se diseñó el diagrama eléctrico, así como la PCB para la posterior fabricación de esta.

Una vez realizado se procedió a la simulación del circuito eléctrico obteniendo los resultados previstos lo cual el proyecto fue un rotundo éxito.

5. Conclusiones

Con este proyecto de sistema de control automático de iluminación, se logró poner en práctica los conocimientos del área de mecatrónica desde lo más básico hasta los más complicados como diseñar un controlador PID, pero todo esto se logró a los amplios conocimientos adquiridos en uso de software de diseño como lo es PROTEUS, SolidWorks ®, así como también el uso de herramientas de programación como lo son CSS COMPILER, MATLAB que son programas muy utilizados en las ingenierías. En este trabajo se logró diseñar y desarrollar los diagramas eléctricos para un sistema de iluminación solar y así controlar de manera eficiente la carga de las baterías. Se aspiró a lograr el poder cargar baterías de distintas tensiones sin importar que el panel sea de mayor o menor tensión que las mismas. Todo esto ingresándole los valores de carga correctos de las baterías. También se diseñaron circuitos que permitieron controlar de manera eficiente el sistema de iluminación solar. Además, se diseñó un control con el cual se permitió tener una carga estable de las baterías. Se diseñó una interfaz gráfica con la cual el usuario va a interactuar con el circuito. Y por último se crearon los diagramas eléctricos con los cuales se detallaron los componentes y las conexiones.

Referencias

[1] Sukran, S.; Cengiz, Kahraman. Socio-economic evaluation model for sustainable solar PV panels using a novel integrated MCDM methodology: A case in Turkey. Socio-Economic Planning Sciences, 2020.

[2] Majewski, P.; Al-shammari, W.; Ducley, M.; Jit, J.; Heon, A.; Myoung, K; Sung, K. Recycling of solar PV panels-product stewardship and regulatory approaches. Energy Poly. 149, 2021.

[3] [3] Alrawashdeh, H.; Stathopoulos, T. Wind loads on solar panels mounted on flat roofs: Effect of geometric scale. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics. 206, 2020.

[4] [4] Jayapradha, P.; Barik, D.; Muhammed, P.; Prahaladha, M. Investigation and separation of waste solar panels. Proceedings Materials, 2020.

[5] [5] Semelane, S.; Nwulu, N.; Kambule, N.; Tazvinga, H. Economic feasibility assessment of manufacturing solar panels in South Africa-A case study of Steve Thswete Local Municipality. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 43, 2020.

[6] [6] Porras, A.; Cobo, B.; cubas, J.; Pindado, S. Simple solar panels/battery modeling for spacecraft power distribution systems. Acta Astronautica. 179. Pag. 345-358, 2021.

[7] [7] Erickson, R.; Maksimovic, D. Fundamentals of power electronics. Edit. Springer; Edición 3rd. ISBN-10: 3030438791, 2020.

[8] [8] Campos, D. Experimentos en teoría de control: Convertidores CD-CD. San Luis Potosí, México. Fecha de recuperación: 12 de mayo del 2020. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://galia.fc.uaslp.mx/lic/P1_30b.pdf&ved=2ahUKEwja4JmRgojrAhUJMawKHfPBBgsQFjAAegQIAhAB&usg=AOvVaw1lnXmpbZKiXDGrGeDvi58a, 2020.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 23, pp. 289 - 305
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Monitoreo de infraestructura civil a través de sensores de fibra óptica distribuidos (DFOS)

Martínez Trujano Luis Álvaro, Gasca Zamora Héctor Miguel, David Vázquez Vega, Hernández Figueroa Jorge Alberto, Quintana Rodríguez Juan Antonio y Mediano Martínez Julio César.

Instituto Mexicano del Transporte
Km. 12+000, Carretera Estatal No. 431 "El Colorado-Galindo", Parque Tecnológico San Fandila, Municipio Pedro Escobedo, Querétaro, C.P. 760703, Tel. (442) 216 9777
amartinez@imt.mx

Resumen

La infraestructura civil ha propiciado el crecimiento de las sociedades a nivel mundial, en nuestro país ha permitido disminuir la brecha de desigualdad, al permitir el alcance de los mismos servicios para los mexicanos, mejorando el intercambio comercial y generando la posibilidad de incrementar las fuerzas económicas y dinamismo en competitividad. El Instituto Mexicano del Transporte en su misión de proveer soluciones al sector transporte para contribuir al desarrollo del país, ha implementado tecnologías innovadoras para construir un futuro más seguro y sostenible. En este artículo, se presenta el diseño de instrumentación y monitoreo simultáneo de elementos estructurales denominados micropilotes (MP) mediante dos tecnologías (Brillouin y Rayleigh) de Sensores de Fibra Óptica tipo Distribuidos (DFOS, Distributed Fibre Optic Sensing) con lo que se obtuvieron las deformaciones unitarias en cada micropilote con resolución espacial de 0.65 mm para el DFOS Rayleigh y 25 cm en el DFOS Brillouin, durante los procesos de colado, primeras horas de fraguado y prueba de carga a compresión. Se concluye que la tecnología DFOS por su simplicidad de implementación puede ser utilizada en cualquier estructura civil para determinar su condición estructural. En los preparativos previos al monitoreo, el proceso para calibrar el sistema DFOS Brillouin demanda más tiempo que su contraparte. En el caso del análisis de la información, se debe tener presente que el volumen de datos es excesivo, en el caso del sistema DFOS Rayleigh al tener una resolución espacial de 0.65 mm, cada archivo supera los 8 GB en tan solo una hora de medición. En general, los dos sistemas DFOS presentan ventajas y desventajas entre ellos que los hacen aptos para diferentes escenarios de monitoreo de infraestructura civil.

Palabras clave: Monitoreo, DFOS, Brillouin, Rayleigh, micropilotes, prueba de carga.

1. Introducción

La infraestructura civil ha sido de gran importancia en el crecimiento de las sociedades a nivel mundial, desde milenios denota la capacidad y destreza de las civilizaciones antiguas, ya que en muchos casos son símbolos actuales de su grandeza. Algunas de las obras antiguas más conocidas son: Las pirámides de Guiza, en Egipto, construidas hace 4500 años, la pirámide principal con una altura de 147 m construida con 2.3 millones de bloques de piedra [1]. El Partenón en Grecia, construido en 440 a.C. con mármol en honor a la diosa Atena, con dimensiones aproximadas de 70 m de largo y 30 de ancho [2,3]. En Italia, el Coliseo Romano, construido a partir del año 71 d.C., es un anfiteatro en forma elíptica con 188 m de longitud y 57 m de altura [4].

En la actualidad las obras civiles más conocidas son: El Burj Khalifa en Dubai, es el edificio más alto en la actualidad con 828 m de altura, construido con acero y concreto fue terminado en 2010 [5].

En el caso del túnel San Gotardo, situado bajo los Alpes suizos, es el de mayor longitud del mundo, con 57 kilómetros y con profundidad máxima de 2.3 km [6]. En México, el puente Baluarte Bicentenario, reconocido hasta 2016 por ser el puente más grande del mundo, construido en 2012 tiene un largo de 1.112 km y una altura sobre del río Baluarte de 402.57 m [7].

Las características de la infraestructura antigua es que ha permanecido por cientos de años a pesar a que han sufrido importantes fenómenos meteorológicos. Por lo que el deseo es que la infraestructura que se construye en nuestros días debe aspirar a prevalecer varias décadas, por lo que es importante continuar mejorando los materiales, procesos constructivos y las estrategias de conservación a mediano y largo plazo de la infraestructura. En este sentido, cobra relevancias el monitoreo de la infraestructura civil, comenzando con los elementos constructivos críticos como son las pilas o los pilotes para la cimentación de obras civiles.

La rigidez en una estructura o edificio comienza con una cimentación sólida. En el caso de cimentaciones profundas, especialmente en pilas y pilotes, se basa en el esfuerzo por fricción entre el terreno y el fuste (Figura 1). Como parte del control de calidad de los cimientos es necesaria una prueba de carga, para garantizar que el pilote puede soportar la carga de diseño de la estructura [8].

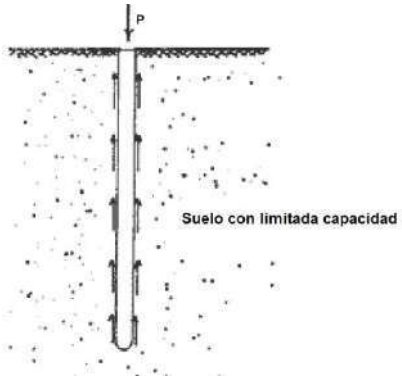


Figura 1. Pilote trabajando a fricción.

Las pruebas de carga en pilotes se emplean para investigación del suelo y diseño de la cimentación, realizándose antes del diseño final y posterior a contratar la construcción de la cimentación (Figura 2). De esta manera, la prueba de carga es útil para evaluar un diseño preliminar, generando un mejor conocimiento del tipo de pilote y suelo en el que se construye. En conclusión, las pruebas de carga permiten conocer características particulares en cuanto a la capacidad de carga, capacidad por fricción y por punta, las transferencias de carga y asentamientos. Con la información recolectada durante la prueba de carga, se toman decisiones en la elección del diseño final de la cimentación.

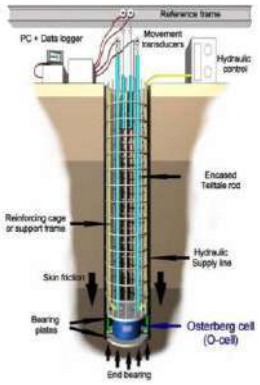


Figura 2. Izquierda, vigas de reacción y derecha, elementos típicos en el monitoreo.

Para obtener información precisa del comportamiento del pilote de cimentación durante la prueba de carga, tradicionalmente se utilizan extensómetros resistivos los cuales son sensores de alta precisión, estos se instalan en diversos puntos de interés antes del colado del elemento estructural. Con el avance de la tecnología en el ámbito de instrumentación, en los últimos años se han utilizado sensores de fibra óptica para el monitoreo de pilas o pilotes de cimentación durante prueba de carga [9-11]. Destacado principalmente los sensores de tipo distribuidos DFOS (Distributed Fibre Optic Sensor), ya que proporcionan información de las deformaciones en toda la longitud del cable de fibra óptica (Figura 3). Estos sensores tienen ciertas ventajas respecto a los sensores eléctricos como: nula interferencia a campos electromagnéticos, son pasivos, resistentes, fáciles de instalar y utilizar [12].

Figura 3. Sensores de fibra óptica tipo DFOS instalado en el acero de refuerzo de una pila.

Actualmente, los sistemas de monitoreo basados en DFOS, ofrecen características novedosas para el monitoreo de la infraestructura civil. Ya que tiene la capacidad de registrar variables físicas como temperatura, deformación unitaria e inclusive vibraciones con discretización en longitud de unos cuantos centímetros, a lo largo de toda la longitud del cable DFOS, que en ocasiones puede llegar a algunos cuantos kilómetros, sin presentar perdidas de información significativas. Es decir, se pueden llegar a tener cientos e inclusive miles de sensores de temperatura o galgas extensométricas en un solo cable de fibra óptica, con la posibilidad de proveer un sistema de monitoreo de gran eficiencia en cuanto a consumo energético, materiales utilizados y tiempo de instalación para el monitoreo de la infraestructura civil (Figura 4) [13].

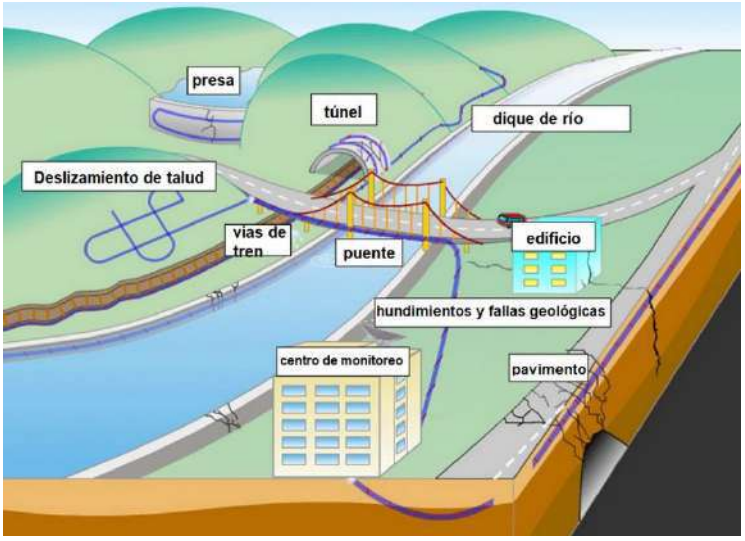


Figura 4. Monitoreo de infraestructura civil con DFOS.

Los sensores de fibra distribuida (DFOS) se basan en fenómenos de dispersión y emplean dispersión de Rayleigh, Raman o Brillouin. Los componentes de la luz dispersada pueden reducirse en frecuencia (componente de Stokes) o cambiarse a frecuencias más altas (componentes anti-Stokes). En particular, el principio de funcionamiento de los sensores basados en dispersión de Rayleigh y Brillouin se basa en los fenómenos de dispersión inducidos por fluctuaciones en las propiedades ópticas de la fibra, que pueden estar asociados con cambios locales o temporales del índice de refracción. Dependiendo del proceso de dispersión, el sensor permite medir diferentes cantidades físicas [14].

1.1 Dispersión Brillouin

La dispersión Brillouin es un efecto causado por la no linealidad de un medio. En otras palabras, es un efecto causado por vibraciones acústicas en el medio, como por ejemplo una fibra óptica, cuando una luz láser la atraviesa. Dependiendo de la intensidad del haz de luz incidente, se puede distinguir entre efectos de dispersión espontáneos y estimulados. Cuando la intensidad de la luz inyectada en el medio es baja, el efecto se produce espontáneamente y, por lo tanto, las fluctuaciones que causan la dispersión de la luz son excitadas por efectos térmicos o mecánicos cuánticos de punto cero. Por otro lado, una vez que la intensidad de la luz incidente excede un cierto umbral, se estimula el efecto de dispersión, ya que las fluctuaciones son inducidas por la presencia del propio haz de luz [15].

1.2 Dispersión Rayleigh

Consiste en que cuando los fotones de la luz se dispersan por las moléculas del aire, las ondas de luz resultantes visibles en la Tierra se encuentran principalmente en el extremo azul del espectro, porque la luz azul se dispersa de forma más eficaz que la roja. Cuando se inyecta luz en una fibra, algunos de los fotones de la luz se dispersan en direcciones aleatorias debido a las partículas microscópicas de la fibra. Este fenómeno es la dispersión de Rayleigh. Además, parte de la luz se dispersa en la dirección opuesta a la luz transmitida, lo que se conoce como retrodispersión [16].

2. Metodología

Con el objetivo de monitorear de manera efectiva los micropilotes (MP) durante el proceso de colado y prueba de carga a compresión, con sensores DFOS de tecnologías Brillouin y Rayleigh. Se llevaron a cabo las siguientes actividades. Primero, se recibieron los equipos necesarios y se verificó minuciosamente su correcto funcionamiento. A continuación, se desarrolló un plan detallado de instrumentación para identificar los tipos de sensores a instalar específicamente en los diferentes tipos de micropilotes.

Una vez completada la fase de planificación, se trasladaron los equipos al sitio de prueba designado. Antes del colado de los micropilotes, se procedió a instalar cuidadosamente los cables DFOS en el armado de acero. De esta manera, se logró un monitoreo continuo y preciso de los sensores DFOS con ambas tecnologías de manera simultánea, tanto antes del colado como durante las primeras etapas de fraguado. Además, se llevó a cabo un seguimiento detallado durante las pruebas de carga a compresión en cada uno de los micropilotes. Por último, una vez recopilados todos los datos relevantes durante el proceso, se procedió a realizar un análisis exhaustivo de la información. Esto se logró mediante el post-procesamiento de los datos obtenidos en campo. Esta etapa de análisis permitió obtener información relevante y tomar decisiones fundamentadas en relación con el comportamiento de los micropilotes.

2.1 Verificación del funcionamiento de los sistemas

Se realizó un inventario y pruebas del correcto funcionamiento de los equipos a utilizar en el monitorio de los micropilotes en el Laboratorio de Pruebas no Destructivas (LPND) del IMT, Figura 5, y Tabla 1. Las pruebas de verificación se realizaron con base en la capacitación provista por parte de los proveedores de los equipos, esto permitió dar certeza sobre el funcionamiento de los equipos para su instalación en campo.

Figura 5. Recepción de equipo ODiSI 6104.

Tabla 1. Equipos e instrumentos de fibra óptica utilizados para las pruebas en micropilotes.

Cantidad	Descripción	Marca	Modelo
1	Sistema de 4 canales fibra óptica para DFOS (Tecnología Rayleigh)	Luna	ODiSI 6104
3	Sensores de deformación unitaria tipo DFOS (Tecnología Rayleigh)	Nerve	EpsilonSensor
3	Extended Lenght (Tecnología Rayleigh)	Luna	ASY006054
3	Adaptador FC01123_LC/APC (Tecnología Rayleigh)	Luna	ODI-SOC-10
1	Sistema de 4 canales fibra óptica para DFOS (Tecnología Brillouin)	NKT PHOTONICS	LIOS -EN.SURE
3	Sensores de deformación unitaria tipo DFOS (Tecnología Brillouin)	NanZee	NZS-DSS-C02
1	Computadora Portátil	Dell	Precision 5550 (P91F)

2.2 Plan de instrumentación de micropilotes

Para la fase de planeación, se identificaron las tres configuraciones de sensores de fibra óptica, de acuerdo a los tres tipos de micropilotes (MP simple, MP con Expander Body y MP con Celda Bidireccional), monitoreado en conjunto con la empresa Mexicana de Anclas Mineras (MAM). En la Figura 6, se ilustra en detalle la instrumentación del micropilote Simple, se indica con línea color rojo el cable DFOS correspondiente al sistema Brillouin, mientras que con línea azul se muestra el cable DFOS del sistema con tecnología Rayleigh.

En la Tabla 2 se ilustra la configuración de sensores elegida por cada tipo de micropilote. Cabe mencionar, que el número indicado entre paréntesis representa la cantidad de sensores a utilizar en el arreglo experimental de cada uno de los micropilotes según el sistema de adquisición de datos.

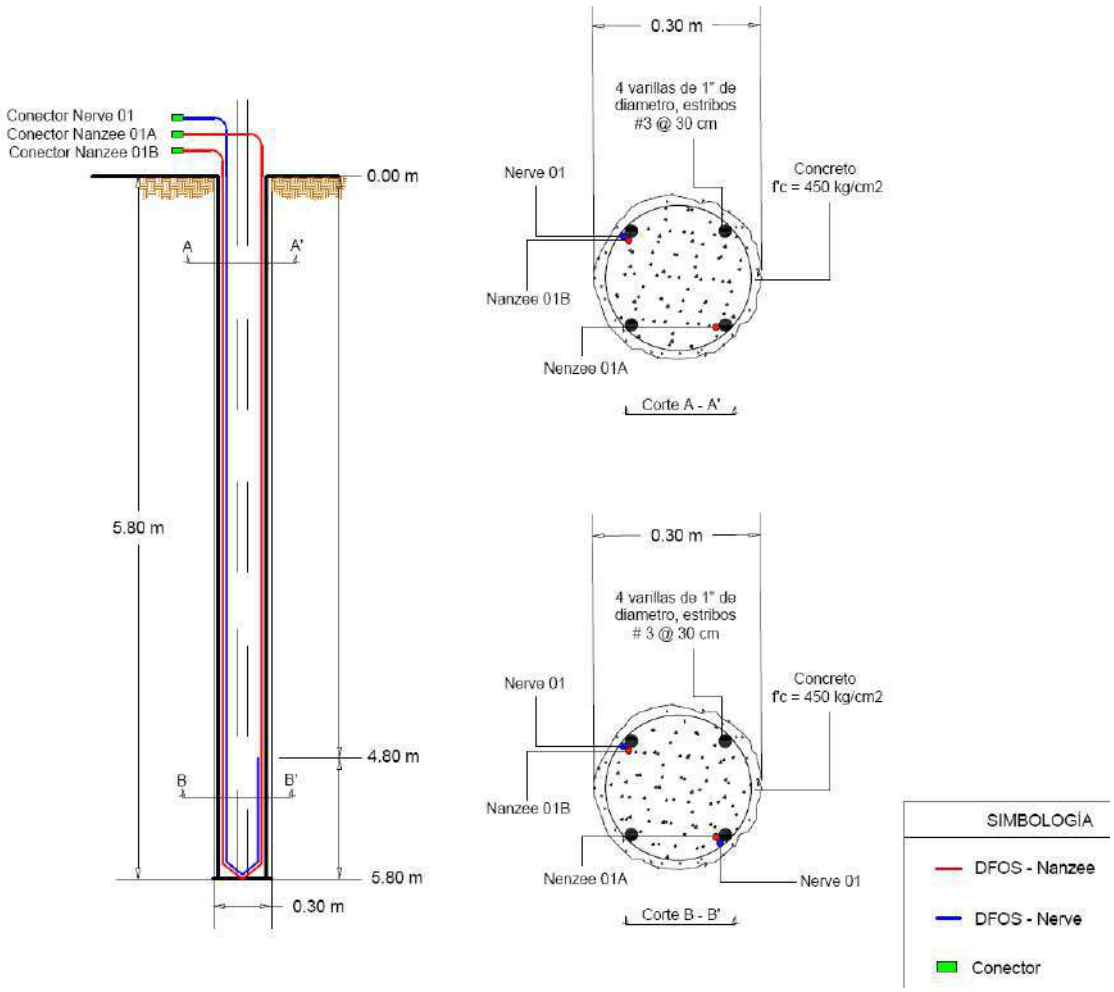


Figura 6. Diagrama de instrumentación del MP Simple.

Tabla 2. Arreglo experimental para las pruebas en micropilotes.

Sitio	Sistema de adquisición de datos	MP simple	MP con Expander Body	MP con Celda Bidireccional
Zapopan, Jalisco	LIOS - EN.SURE	(1) sensor deformación unitaria (DFOS-NanZee)	(1) sensor deformación unitaria (DFOS-NanZee)	(1) sensor deformación unitaria (DFOS-NanZee)
	ODiSI 6104	(1) sensor deformación unitaria (DFOS-Nerve)	1 sensor deformación unitaria (DFOS-Nerve)	(1) sensor deformación unitaria (DFOS-Nerve)

2.3 Instalación de cables DFOS y monitoreo de micropilotes

Desde las instalaciones del IMT se trasladaron los equipos al sitio de pruebas ubicado en Zapopan, Jalisco. El 18 de abril de 2023, se realizó la instrumentación con los sensores de fibra óptica en la siguiente secuencia: micropilote con fuste simple, micropilote con Expander Body y micropilote con Celda Bidireccional. En cada uno de los micropilotes, los cables de los sensores DFOS (NanZee y

Nerve), se sujetaron a través de cinchos sujeta cables, con espaciamientos cada 20 cm a las varillas de acero de refuerzo. En el caso del sensor DFOS marca NanZee se tuvo redundancia en la longitud total de cada micropilote. En cambio, en el sensor DFOS marca Nerve se consiguió redundancia en el último metro respecto a la profundidad máxima de cada uno de los micropilotes, ver Figura 7. Una vez instrumentado por completo, el armado de acero del micropilote se introdujo al pozo, ver Figura 8.

Figura 7. Redundancia de un metro en cable DFOS Nerve para micropilote con Expander Body.

Figura 8. Colocación del armado de acero dentro del pozo del micropilote Simple.

En el micropilote con Celda Bidireccional, se instalaron sensores DFOS Nanzee y Nerve, ver Figura 9. Una vez que se introdujo el acero de refuerzo dentro del pozo se inició con el monitoreo de los sensores de fibra óptica antes de verter el concreto, ver Figura 10, así como en las primeras horas de fraguado y durante la inyección de lechada en el Expander Body, ver Figura 11, y la Celda Bidireccional.

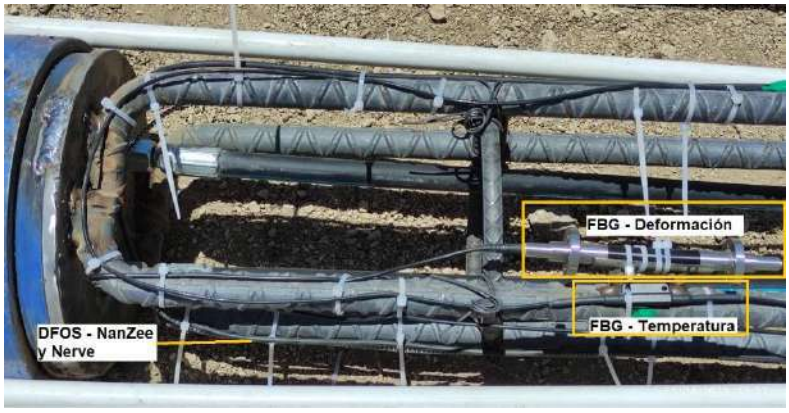


Figura 9. Instrumentación en micropilote con Celda Bidireccional.

Para el monitoreo con DFOS, en los sistemas LIOS y ODiSI, se conectaron los sensores con la siguiente relación: Canal 1 – micropilote Simple, Canal 2 – micropilote con Expander Body y Canal 3 – micropilote con Celda Bidireccional.

Para la configuración de adquisición de datos con los sensores DFOS con tecnología Brillouin marca NanZee se realizó mediante el sistema LIOS EN.SURE en el programa Charon4 Rev. 4.2.42.22715 (LTS), con un periodo de muestreo cada 230 segundos y una resolución en longitud de 25 centímetros. En cuanto al monitoreo de los sensores DFOS de tecnología Rayleigh, marca Nerve se efectuó a través del sistema ODiSI 6104 con el programa ODiSI 6 ver. 2.4.2, con periodo de muestreo de 0.48 segundos y una resolución en longitud de 0.65 milímetros.

Figura 10. Colado del micropilote Simple.

Como etapa final en el sitio de Zapopan el 21 de abril de 2023 se monitoreo durante las pruebas de carga a compresión con la secuencia: micropilote con Expander Body, micropilote con Celda Bidireccional y micropilote Simple. En cada micropilote, se alcanzó la carga máxima a compresión a través de 10 incrementos de carga. En seguida, se descargó el micropilote en tres decrementos. Posteriormente, al micropilote se aplicó la carga máxima de diseño a compresión, en un único incremento, para descargarlo por completo, ver Figura 12. En la Tablas 3 se detallan los periodos de aplicación de carga durante las pruebas de carga a compresión de los tres tipos de micropilotes.

Figura 11. Inyección de lechada en el micropilote con Expander Body.

Figura 12. Monitoreo del micropilote con Celda Bidireccional durante la prueba de compresión.

2.4 Análisis de la información

Se realizó un post-procesamiento de los datos obtenidos a través de la implementación de técnicas de filtrado y análisis estadístico con el fin de eliminar señales indeseadas generadas por el ruido intrínseco de los elementos del sistema de medición y minimizar el periodo de análisis de los datos. En el caso del sistema ODiSI (tecnología Rayleigh), durante el monitoreo en las pruebas experimentales, se almacenó información cada 0.48 segundos en cada uno de los 0.65 milímetros de la fibra óptica. Por lo que, para el análisis se sintetizó la información calculando el promedio del conjunto de datos por cada segundo con resolución de longitud de 13 milímetros utilizando un algoritmo desarrollado en Python 3.7.2. Respecto al sistema LIOS EN.SURE (tecnología Brillouin), el monitoreo se realizó cada 230 segundos, con resolución en longitud de 25 centímetros. En este caso, debido a los mayores espaciamientos en muestras comparado con el sistema ODiSI, no se requirió sintetizar la información, de esta manera se efectuó el proceso de análisis con toda la información disponible.

Tabla 3. Relación de carga en las pruebas a compresión en los tres micropilotes.

Etapa	Incremento / decremento	MP Expander Body		MP Celda BD		MP Simple	
		Hora	Carga aplicada (t)	hora	Carga aplicada (t)	hora	Carga aplicada (t)
Carga	0	11:00:00	0	14:24:00	0	16:48:00	0
		11:05:00	0	14:31:00	0	16:52:00	0
	1	11:07:00	25	14:33:00	15	16:53:00	10
		11:13:00	25	14:38:20	15	16:58:00	10
	2	11:15:00	50	14:39:18	30	16:59:00	20
		11:20:00	50	14:44:18	30	17:04:00	20
	3	11:22:00	75	14:45:00	45	17:04:30	30
		11:26:20	75	14:50:00	45	17:09:30	30
	4	11:29:06	100	14:51:40	60	17:10:40	40
		11:33:48	100	14:56:50	60	17:15:30	40
	5	11:35:50	125	14:57:50	75	17:17:00	50
		11:40:40	125	15:03:00	75	17:23:00	50
	6	11:42:50	150	15:05:45	90	17:24:00	60
		11:47:40	150	15:09:20	90	17:29:19	60
	7	11:50:00	175	15:11:30	105	17:30:20	70
		11:55:50	175	15:16:00	105	17:35:10	70
	8	11:58:30	200	15:18:00	120	17:36:40	80
		12:03:00	200	15:23:10	120	17:41:06	80
	9	12:08:40	225	15:25:30	135	17:42:30	90
		12:14:06	225	15:30:00	135	17:47:10	90
	10	12:15:03	250	15:31:00	150	17:50:20	100
		12:20:06	250	15:33:20	150	17:54:00	100
Descarga	11	12:15:03	250	15:36:30	105	17:58:00	110
		12:20:06	250	15:38:30	105	18:00:00	110
	12	12:29:36	150	15:39:40	60	18:02:00	70
		12:32:15	150	15:41:43	60	18:03:00	70
	13	12:39:00	75	15:44:57	0	18:05:00	30
		12:41:30	75	15:48:00	0	18:07:00	30
	14	12:44:00	0	No aplica	No aplica	18:08:00	0
		12:49:18	0	No aplica	No aplica	18:13:00	0

3. Resultados

A continuación, en la Figura 13 a Figura 23, se presentan los resultados obtenidos en el monitoreo de los sensores DFOS, respecto a las deformaciones unitarias, en microdeformaciones, en cada uno de los micropilotes (Simple, con Expander Body y Celda Bidireccional) en las pruebas experimentales efectuadas en conjunto con la empresa MAM del sitio de prueba en Zapopan, Jalisco; durante las etapas: colado-fraguado, aplicación de lechada y prueba de carga a compresión.

3.1 Resultados del micropilote Simple

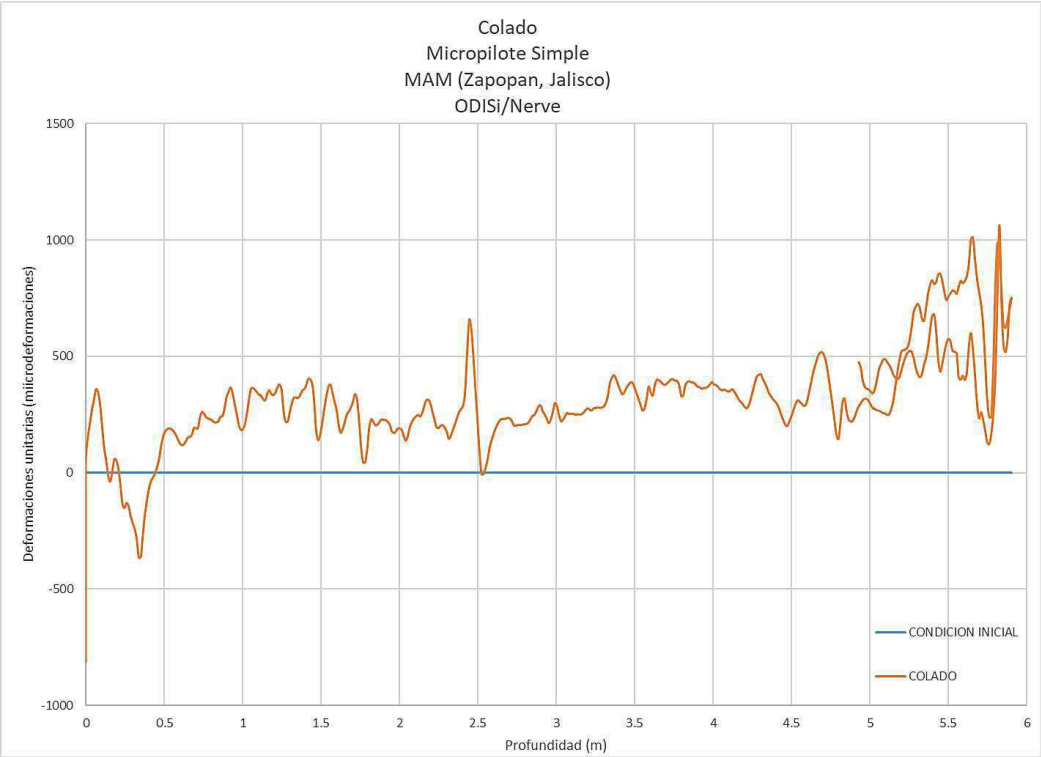


Figura 13. Resultado en MP Simple posterior al colado.

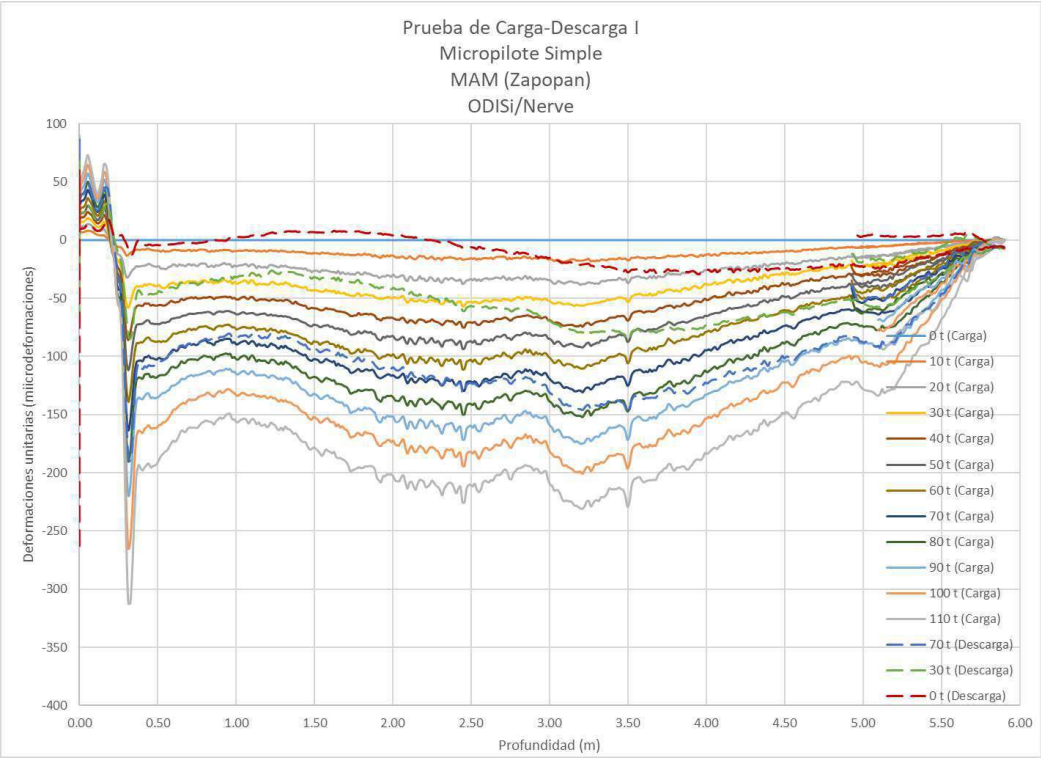


Figura 14. Resultado en MP Simple en primera prueba de carga a compresión.

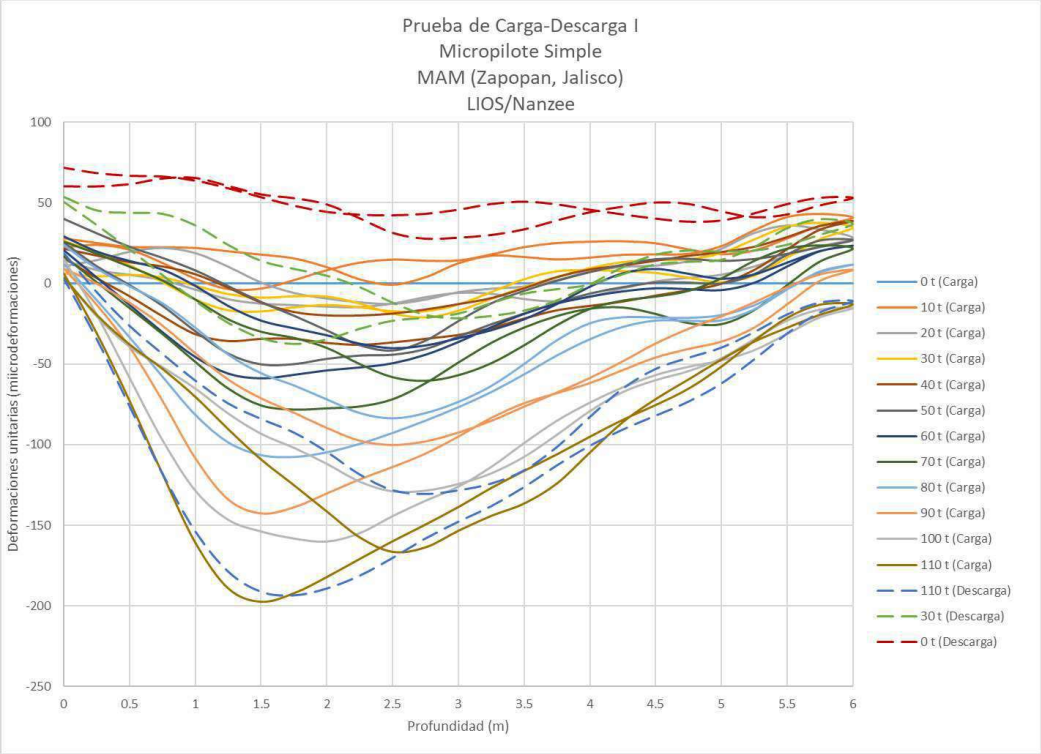


Figura 15. Resultado en MP Simple en primera prueba de carga a compresión.

3.2 Resultados del micropilote con Expander Body

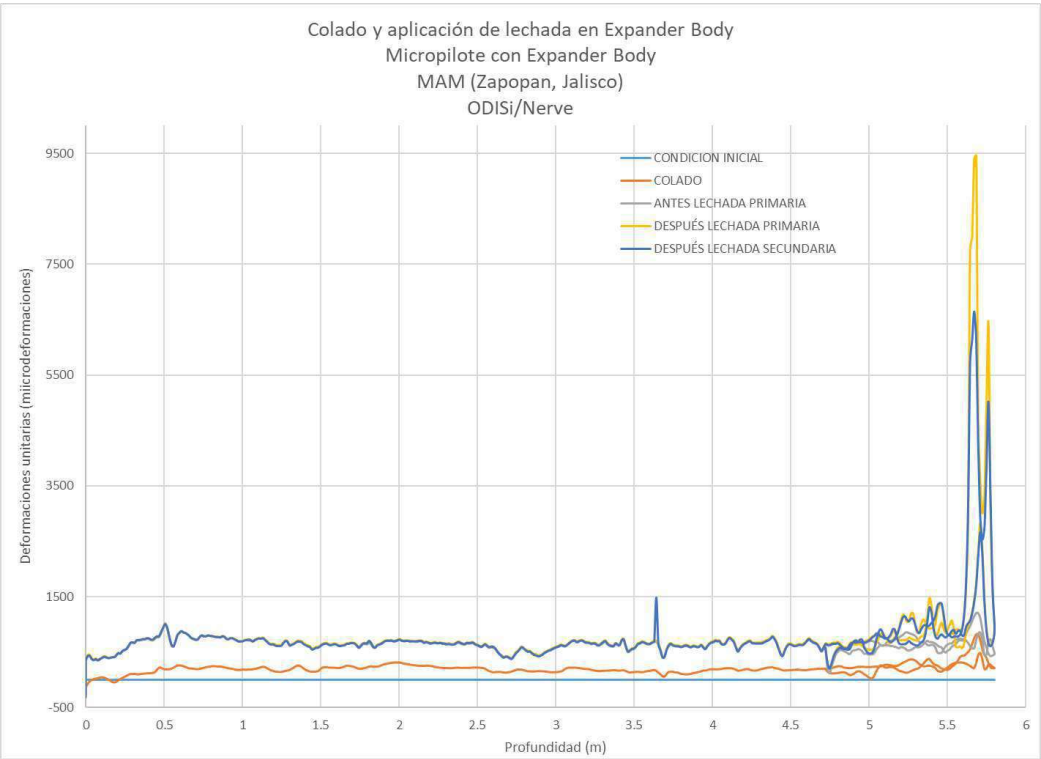


Figura 16. Resultado en MP con Expander Body posterior al colado y lechada.

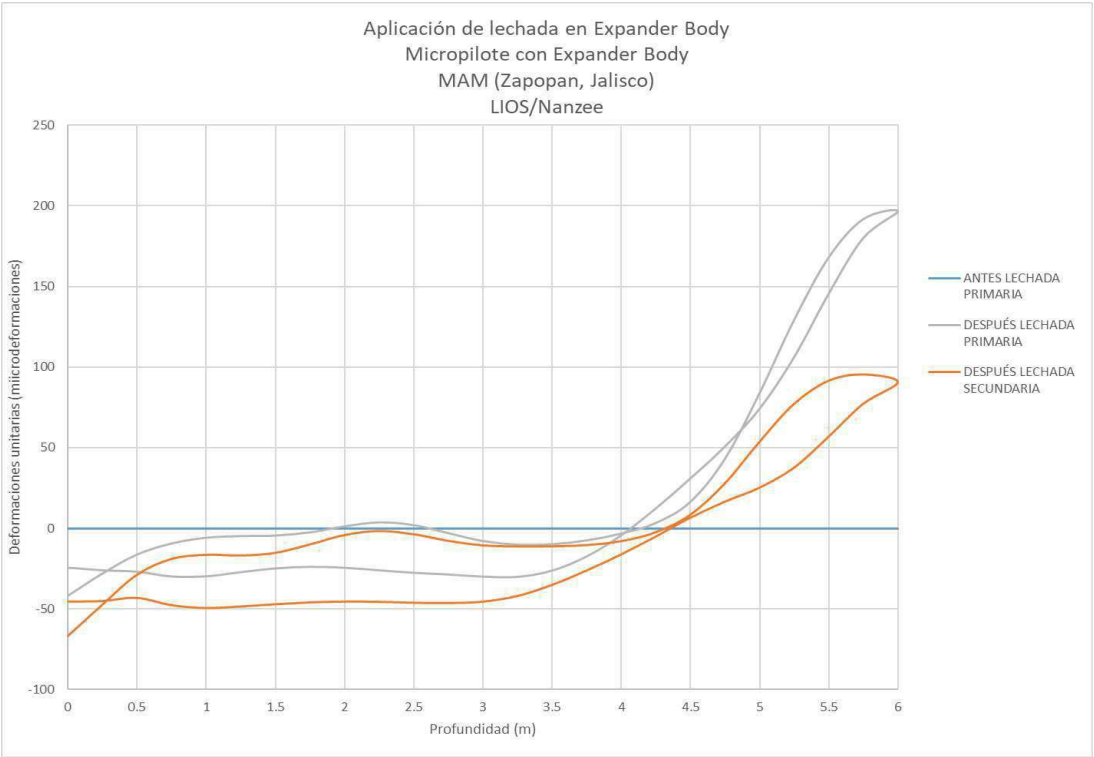


Figura 17. Resultado en MP con Expander Body durante lechada.

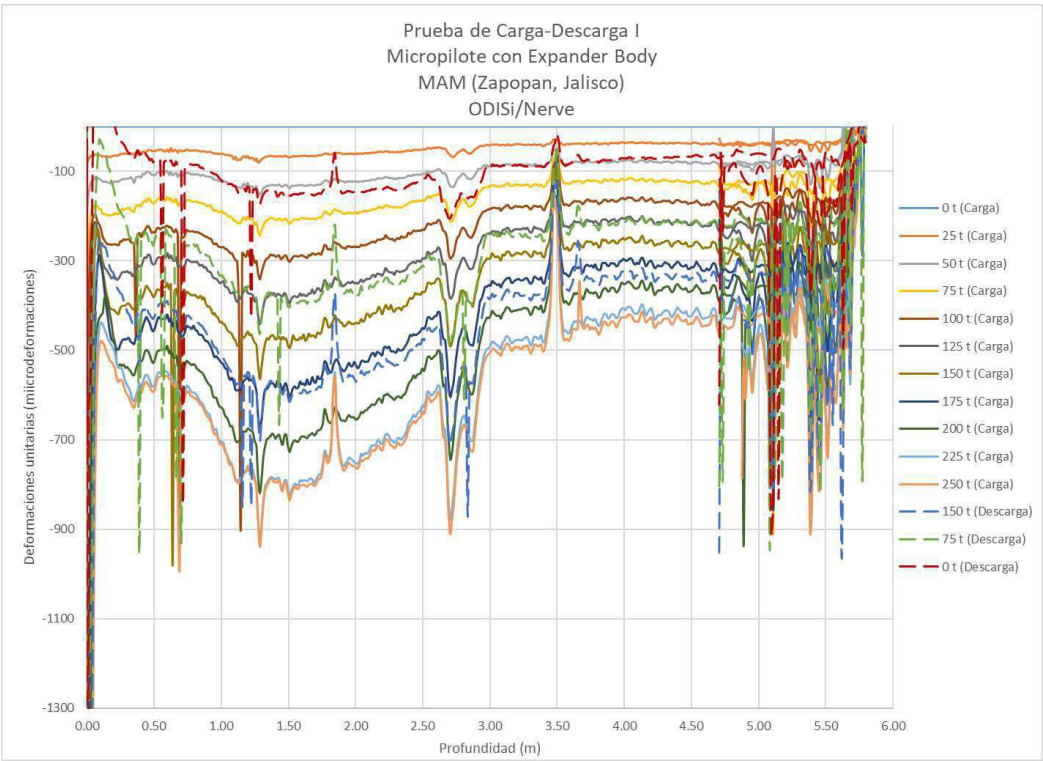


Figura 18. Resultado en MP con Expander Body en primera prueba de carga a compresión.

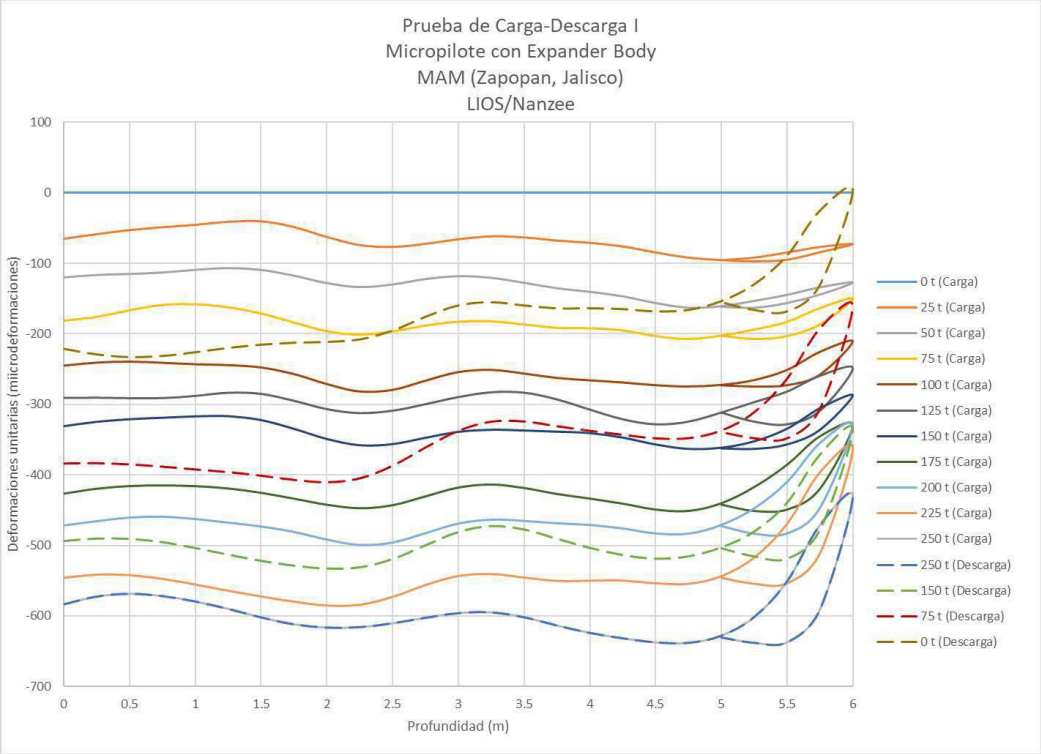


Figura 19. Resultado en MP con Expander Body en primera prueba de carga a compresión.

3.3 Resultados del micropilote con Celda Bidireccional

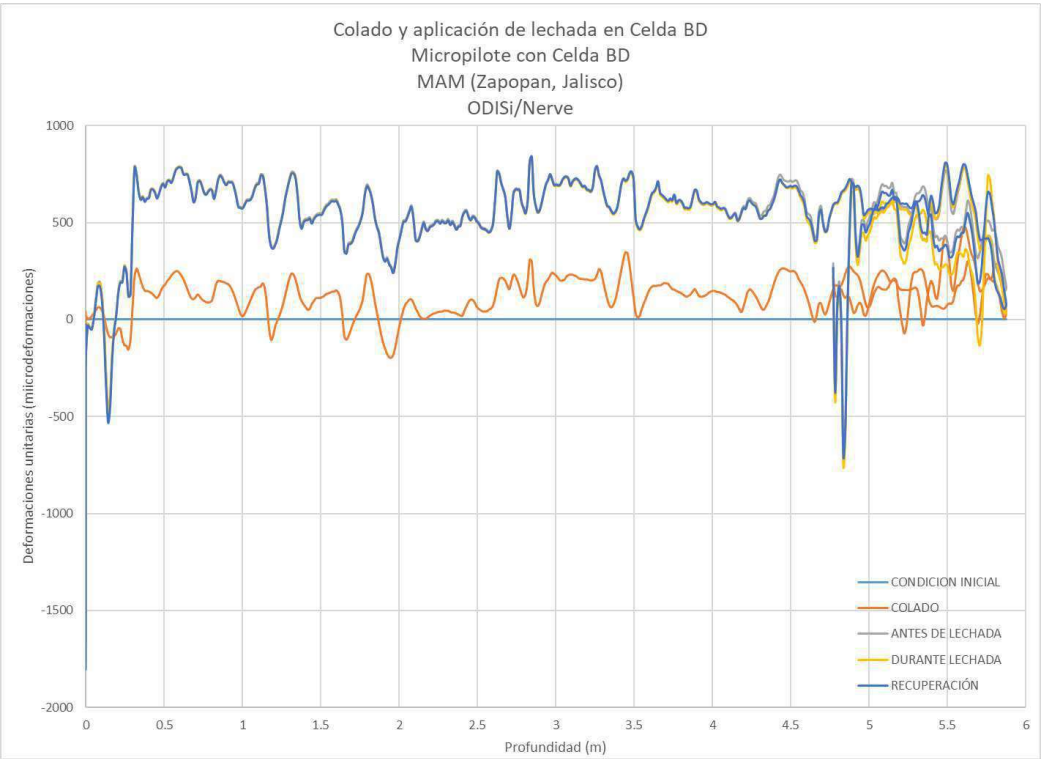


Figura 20. Resultado en MP con Celda Bidireccional posterior al colado y lechada.

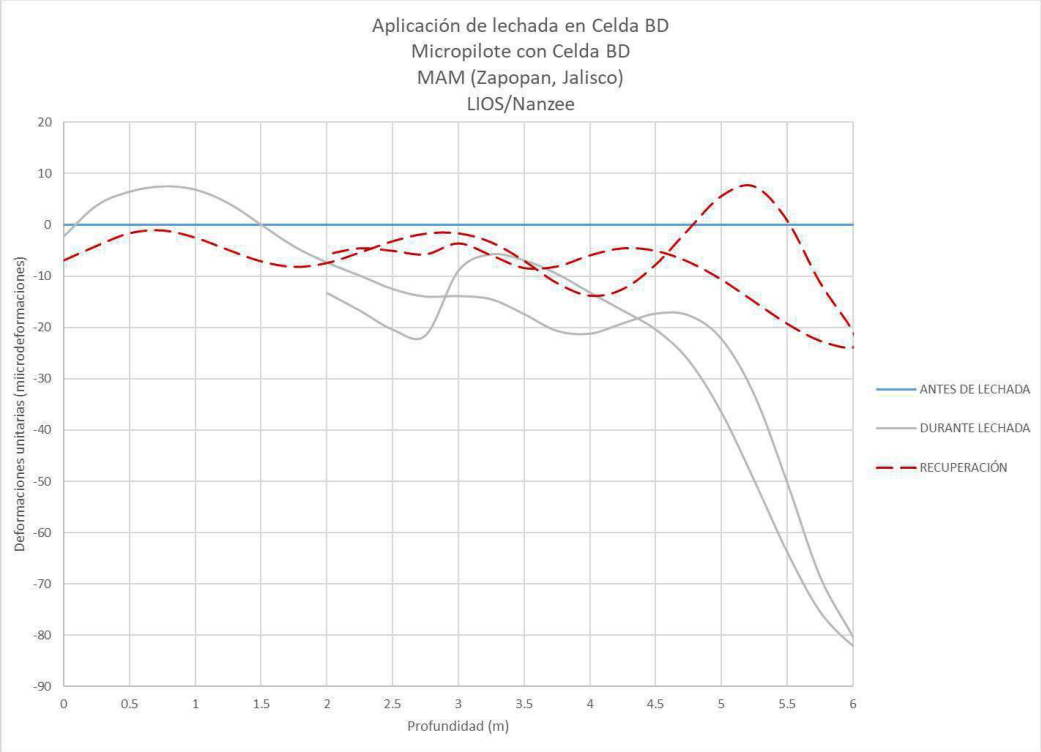


Figura 21. Resultado en MP con Celda Bidireccional durante lechada.

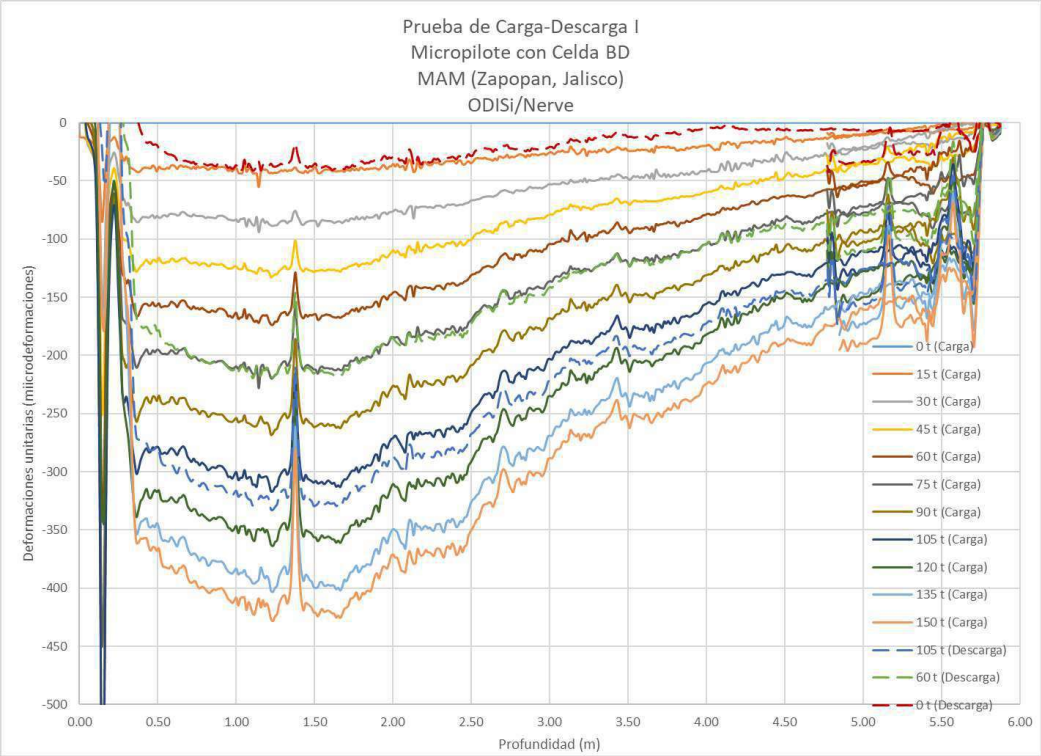


Figura 22. Resultado en MP con Celda Bidireccional en primera prueba de carga a compresión.

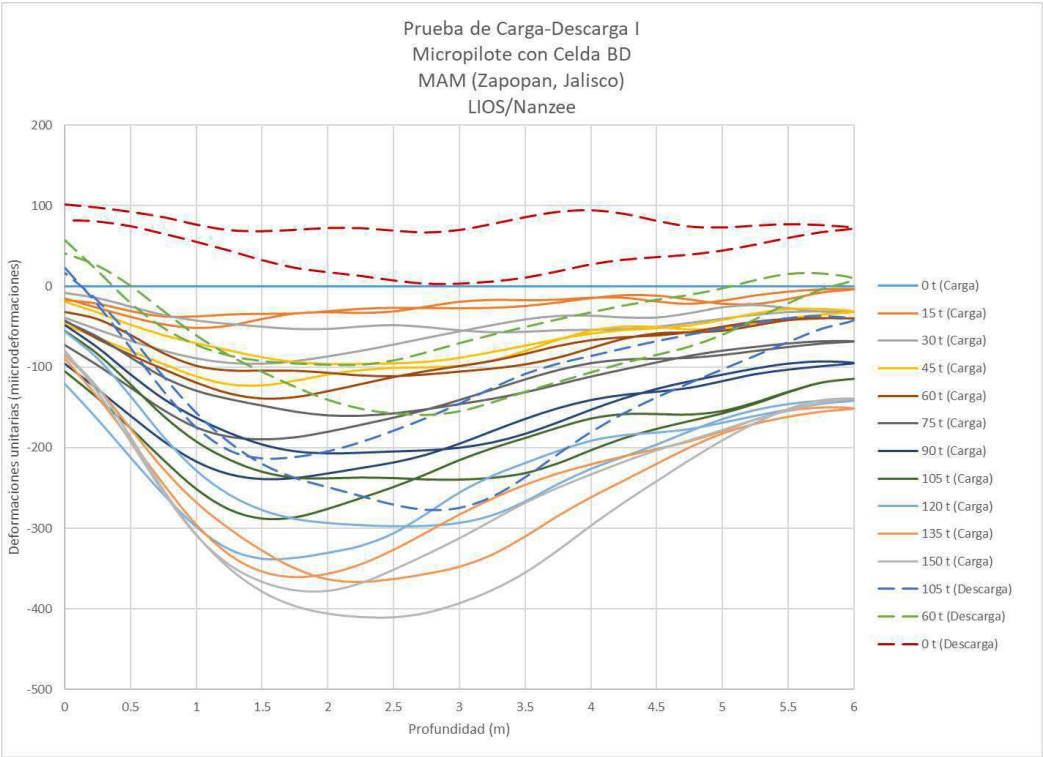


Figura 23. Resultado en MP con Celda Bidireccional en primera prueba de carga a compresión.

4. Conclusiones y recomendaciones en trabajos futuros

Al finalizar las actividades de instrumentación, monitoreo y análisis de los resultados de los sensores DFOS con tecnologías Rayleigh y Brillouin, en los tres micropilotes, se concluye que las deformaciones unitarias obtenidas de cada uno de los micropilotes, son similares en amplitud de deformación unitaria en los diferentes escalones de carga de las pruebas a compresión.

Un factor importante a considerar es el almacenamiento de la información, el volumen de datos es excesivo, tomando en cuenta que los cambios en los parámetros monitoreados de los micropilotes durante las pruebas experimentales son lentos y los periodos de medición son extensos, en ocasiones hasta 9 horas continuas. En el caso específico de la configuración utilizada en el sistema Rayleigh (ODiSI 6104), al obtener muestras cada 0.48 segundos y discretización en cuanto a la longitud del sensor en cada 0.65 milímetros se generaron archivos por cada canal de medición de hasta 8 GB. Ocasionando un incremento innecesario en el tiempo del procesamiento y análisis de la información. Por lo que, es recomendable incrementar el periodo de muestreo al menos a 20 segundos y con resolución en longitud por lo menos de 10 milímetros.

Con respecto al sistema Brillouin (LIOS EN.SURE), se debe considera que el sistema en conjunto con el cable DFOS deben ser calibrados cada que se encienda el equipo de interrogación o se conecte un sensor DFOS, debido a la tecnología utilizada el proceso de configuración demanda 20 minutos por cada sensor.

Debido a que los trabajos se realizaron en zonas de obra en donde se presentan condiciones ambientales no controladas como: excesivo polvo y salpicaduras de agua o lechada. En futuras actividades de instrumentación y monitoreo con los equipos de fibra óptica se recomienda que el sistema de interrogación (ODiSI y/o LIOS), sea aislado por completo dentro de un gabinete para evitar daños en los equipos de medición. Adicionalmente, se debe considerar concientizar al personal de obra con

respecto a los sensible que son los cables DFOS, y con ello reducir los tiempos de procesamiento adicional en el análisis de la información por señales indeseadas generadas por pisadas o tirones en los cables.

Finalmente, por el desempeño en campo observado en cada uno de los sistemas DFOS con tecnologías Rayleigh y Brillouin, es evidente que cubren diferentes necesidades en el ámbito del monitoreo de la infraestructura civil. El sistema Brillouin, se enfoca en registrar fenómenos con cambios lentos en el tiempo, con resolución espacial cada 25 cm, pero con la capacidad de cubrir longitudes de medición hasta kilómetros. Mientras que el sistema Rayleigh, se orienta a mediciones instantáneas con resolución espacial de 0.65 mm, con la limitante de registrar solo en un par de centenas de metros.

Referencias

[1] Handwerk B. National Geographic. *Las claves de las pirámides de Guiza*. [Consulta en línea]. https://www.nationalgeographic.es/historia/las-claves-de-las-piramides-de-guiza
[2] Murcia F. National Geographic. *Partenón, el gran templo de atenea*. [Consulta en línea]. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/partenon-gran-templo-atenea_6357
[3] Civitatis Atenas. *Partenón de Atenas*. [Consulta en línea]. https://www.atenas.net/partenon
[4] Italy Museum. *Coliseo Romano*. [Consulta en línea]. https://www.rome-museum.com/es/coliseo-romano.php
[5] Segui P. Ovacen. *Edificio más alto del mundo: Ranking 30 edificios altos*. [Consulta en línea]. https://ovacen.com/el-edificio-mas-alto-del-mundo-y-con-diseno-original/
[6] Noticias Colminas. *El túnel más largo y profundo del mundo se inaugura el 1 de junio*. [Consulta en línea]. https://www.colminas.com/el-tunel-mas-largo-y-profundo-del-mundo-se-inaugura-el-1-de-junio/#:~:text=El%20t%C3%BAnel%20de%20base%20de,Se%20dice%20pronto.
[7] México desconocido. *Puente Baluarte Bicentenario, uno de los más altos del mundo*. [Consulta en línea]. https://www.mexicodesconocido.com.mx/puente-baluarte-bicentenario-uno-de-los-mas-altos-del-mundo.html
[8] Foundtest (M) Sdn. Bhd. (2007). *Pile Maintain Load Test (MLT)*. [Consulta en línea]. http://www.foundtest.com.my/services/mlt.html
[9] NKT Photonics. (2020). *What keeps our motorways in place?*. [Consulta en línea]. https://lios.wp.prod.ng.peytz.dk/wp-content/uploads/sites/2/2018/11/what-keeps-our-motorways-in-place.pdf
[10] De Battista, N., Kechavarzi, C., Seo, H., Soga, K., & Pennington, S. (2016). *Distributed fibre optic sensors for measuring strain and temperature of cast-in-situ concrete test piles*. In Transforming the Future of Infrastructure through Smarter Information: Proceedings of the International Conference on Smart Infrastructure and ConstructionConstruction, 27–29 June 2016 (pp. 21-26). ICE Publishing.
[11] Rui, Y., Kechavarzi, C., O'Leary, F., Barker, C., Nicholson, D., & Soga, K. (2017). *Integrity testing of pile cover using distributed fibre optic sensing*. Sensors, 17(12), 2949.
[12] Wu, T., Liu, G., Fu, S., & Xing, F. (2020). *Recent progress of fiber-optic sensors for the structural health monitoring of civil infrastructure*. Sensors, 20(16), 4517.
[13] Kishida, K., Imai, M., Kawabata, J., & Guzik, A. (2022). *Distributed Optical Fiber Sensors for Monitoring of Civil Engineering Structures*. Sensors, 22(12), 4368.
[14] Iribas Pardo, H. (2018). *Contribution to the advancement of Brillouin optical time-domain analysis sensors*.
[15] Iribas, H., Loayssa, A., Sauser, F., Llera, M., & Le Floch, S. (2017, April). *Enhancement of signal-to-noise ratio in Brillouin optical time domain analyzers by dual-probe detection*. In 2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS) (pp. 1-4). IEEE.
[16] Young, A. T. (1981). *Rayleigh scattering*. Applied optics, *20*(4), 533-535.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 24, pp. 306 – 318
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Diseño e integración de un robot cartesiano para pruebas de trayectorias continuas de corte

Gregori López Daniel, Torrez Méndez Sergio Javier, Mendoza Vázquez José Rafael, Ramírez Palacios Vicente y Rojas Cuevas Irma Delia

Instituto tecnológico de Puebla
Av. Tecnológico No. 420, Col. Maravillas, Puebla, Puebla, México, C.P. 72220
iM22220008.62@puebla.tecnm.mx

Resumen

En este documento se presenta el diseño de la estructura de un sistema para la prueba de trayectorias continuas de corte, el cual está formado por un eje X con cama móvil, eje Y suspendido en el que se acopla el eje Z en su movimiento. Se hace uso de software CAD para dibujar las piezas necesarias en el sistema e integrarlas. Como guía para las medidas de las piezas se ha tomado como base catálogos de empresas dedicadas a la manufactura de piezas orientadas a robots cartesianos. Este trabajo pretende presentar el diseño de la estructura que servirá como base para trabajos futuros que permitan realizar pruebas de fuerza y movimiento previo al armado en físico para integrar los actuadores y con ello dar pie a la generación y prueba de trayectorias de corte.

Palabras clave: Robot cartesiano, espacio de trabajo, diseño.

1. INTRODUCCIÓN

El gran volumen de producción y la calidad de los productos ha hecho que maquinas reemplacen la mano de trabajo humana. La intervención de máquinas en procesos reduce los errores de fabricación en piezas, dando como resultado tolerancias cada vez más pequeñas y mejor calidad en el producto.

Las industrias de manufactura actualmente utilizan robots cartesianos (tipo de robot industrial, el cual forma ángulos de 90° entre sus distintos ejes de movimiento que solo pueden moverse en un espacio bidimensional realizando movimientos hacia adelante o atrás.) con un control numérico por computadora capaz de seguir trayectorias de corte preestablecidas que conlleva a un uso mayor de actuadores electro/electrónicos que resulta en un mayor consumo de energía para la fabricación de piezas. [1]

El ejecutar un programa CNC conlleva a determinar la mejor trayectoria de corte (conjunto de procedimientos que se aplican en centros de maquinado, para fabricar piezas) que conlleve a una reducción importante en el tiempo de operación, reducción de consumo de energía, cumplir con tiempos establecidos y calidades requeridas.

Actualmente las maquinas disponibles en el mercado, tienen trayectorias preestablecidas por el fabricante, las cuales pueden ser usadas sin importar el tipo y características del material a trabajar, aunado de no tener una comparativa o sugerencia de uso entre una u otra. [2] [3]

El diseñar un sistema que permita probar nuevas o mejores trayectorias de corte busca tener como resultado una comparativa entre los tiempos de corte, ahorro de energía y calidad de la pieza fabricada al probar en este las trayectorias de corte a distintos materiales. En la figura 1 se muestra un ejemplo de cómo el seleccionar un tipo u otro de trayectoria arroja como resultado un tiempo de corte distinto. [4]

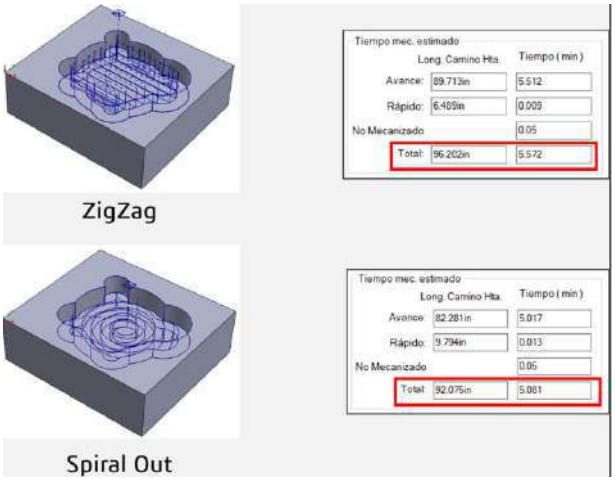


Figura 1. Ejemplos de trayectorias de corte con su tiempo de mecanizado. Fuente: [3]**.**

2. METODOLOGIA

El trabajo desarrollado en este documento está enfocado en el diseño de una estructura que permita probar nuevas o mejores trayectorias de corte, la metodología a seguir para diseñar el sistema es la siguiente:

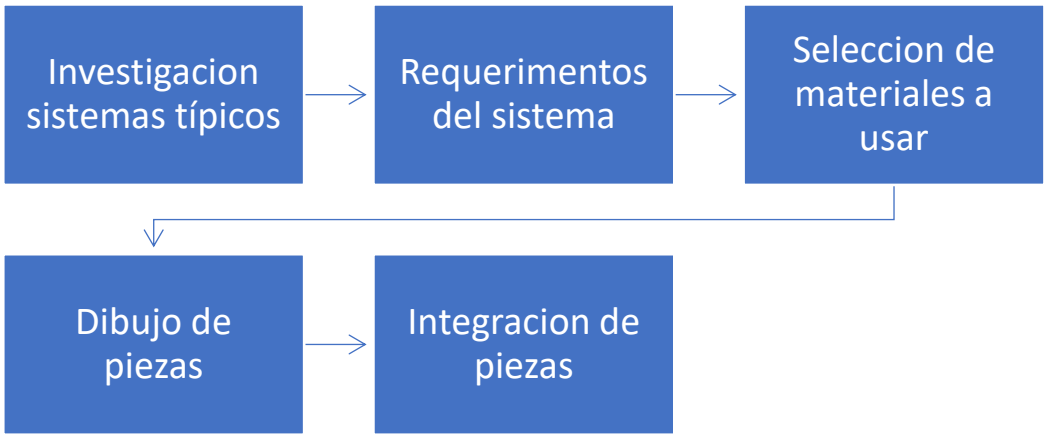


Figura 2. Metodología.

La investigación de sistemas típicos consiste en la búsqueda de sistemas enfocados o relacionados con máquinas que realicen corte de material en base a robots cartesianos. Para tener una base del diseño de nuestro sistema. Con ello podremos seleccionar cual es el mejor tipo de estructura que se pueda implementar, teniendo en cuenta el material con el que se dispone en el laboratorio.

Se prosigue a establecer el área de trabajo que son las medidas con las que debe de cumplir la estructura del sistema tal como el ancho y la profundidad. Selección de los materiales a utilizar en el diseño del sistema adecuados para las dimensiones que necesita el sistema tales como las medidas de largo de las guías lineales, el diámetro necesario que deben de tener para evitar deflexiones y soportar los esfuerzos cortantes a los que se verán sometidos.

Finalizando con el dibujo de las piezas en software CAD basadas en catálogos de proveedores para piezas que deben de ser adquiridas o por diseño propio como el caso de soportes de motor que

se necesitaran para sujetar los motores a los perfiles de aluminio. Con todas las piezas dibujadas se realizará la integración de estas en SOFTWARE CAD para tener una previa visualización del diseño propuesto; y con proponer el modelo final con el que se va a trabajar.

3. Sistemas típicos

Como sistemas típicos se han investigado aquellos sistemas que se basan en el uso de un robot cartesiano. Se ha encontrado sistemas de PICK AND PLACE encargados de embalar u organizar las piezas por paquetes o secciones a una gran velocidad en unidades de almacenamiento como cajas. El uso de esta estructura en nuestro diseño es inadecuado debido a como se construye. Este tipo de diseño no soportará la gran carga que deberá de soportar el robot en el actuador final. [6]

Robots de almacenamiento usados en bodegas para guardar en RACKS las mercancías de las empresas, el uso de estas estructuras esta más destinada al almacenamiento y pueden ser más susceptibles a vibraciones, algo que debe de soportar el diseño de nuestra estructura. un ejemplo de este sistema se muestra en la figura 3.

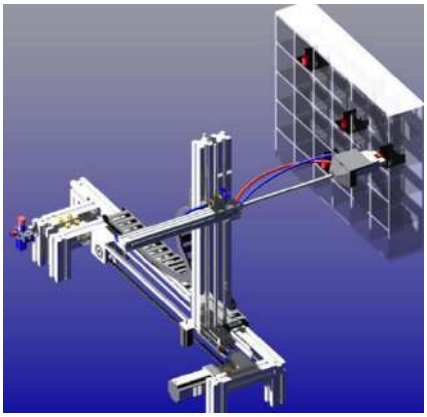


Figura 3. Sistema de almacenamiento. Fuente: [4]**.**

Sistema de trazado que son aquellos encargados de dibujar figuras sobre una superficie plana. ROUTERS CNC enfocados en el corte y perfilado de materiales, en la figura 4, se muestra un ejemplo de un sistema ROUTER. Este tipo de diseño resulta ser una de las mejores opciones debido a que está diseñado para el trazo de perfiles, pueden soportar buena carga en donde se colocara el actuador final y se puede reducir mucho el impacto de la vibración y deflexión de las piezas al añadir soportes en posiciones específicas. [5]

Figura 4. Sistema ROUTER CNC. Fuente: [6]**.**

Y por último impresoras 3D encargadas de la adicción de material para la creación de piezas en físico, para dar un ejemplo de este tipo de sistema se muestra la figura 5 en donde se está realizando una impresión 3D. este tipo de estructura también es adecuado para nuestro diseño de estructura, debido a que está enfocado en la adición de material, su diseño toma en cuenta vibraciones que se puedan dar y evitar deflexiones en los perfiles de soporte del actuador final. [7] [8] [9]

Figura 5 Sistema impresora 3D. Fuente: [8]**.**

4. Requerimentos del sistema.

4.1 Espacio de trabajo

Se propone tener un espacio de trabajo de 90 cm eje X con 90 cm eje Y, una distancia que nos permitirá tener un buen recorrido de los ejes donde podremos probar un gran número de trayectorias, teniendo también una gran tolerancia de espacio de trabajo donde se evitará tener colisiones en el recorrido de los ejes. También el tener una carrera de esta medida resulta adecuada para que los actuadores sean capaces de mover el peso total de cada eje sin llegar a ejercerlos demasiado y aumentando su vida útil.

Debido a que el enfoque primordial de este banco de pruebas son las trayectorias en dos dimensiones la altura será de cuarenta centímetros, altura que permitirá poner el eje z con un tamaño de 20 cm y con ello tener una variación de altura con respecto al actuador final de veinte centímetros, esta altura bastará para poder intercambiar de acuerdo con la necesidad de proyectos futuros poder colocar distintos actuadores finales y probar las trayectorias de corte. [10] [11][12]

4.2 Material por utilizar

Los materiales por utilizar en el banco de pruebas dependen de la disponibilidad de estos en el laboratorio, del recurso que fue proporcionado para compra de algunos y accesibilidad a ellos. Se hace la comparativa de varios modelos para ver sus ventajas y desventajas respecto al uso en el diseño y con ello poder seleccionar las mejores piezas aun con la limitación del recurso disponible.

4.2.1 Estructura

En el laboratorio se cuenta con dos medidas disponibles de perfil de aluminio (40x40 y 28x28), se utiliza Perfil de aluminio 28x28, gracias a ser un material muy liviano que permite una fácil manipulación, además de que reduce considerablemente el peso de la estructura debido al material del que está compuesto y tiene un gran soporte a esfuerzos cortantes y poca deflexión al momento de la aplicación de la carga.

Esto reduce considerablemente los costos al ser necesario el uso de menos material para construir una estructura fiable para el proyecto que se está llevando a cabo. Para la unión de los perfiles de aluminio son usadas escuadras de aluminio 28x28 adecuadas para el perfil que se está ocupando,

mismas que logran soportar una gran carga y garantizar un montaje preciso a la estructura. La tornillería y tuercas T utilizadas son las correspondientes de acuerdo con la medida del perfil y la escuadra de aluminio, la tornillería cuenta con sistema antiderrapamiento, lo cual aumenta la seguridad de la estructura evitando que las piezas se muevan durante la fase de pruebas de las trayectorias.

4.2.2 Actuadores y sensores

Para dar el movimiento a la estructura se utilizan motores POLOLU 12 de volts con caja de engranes, la velocidad máxima que entregan son 79 revoluciones por minuto y debido a su caja tiene una gran fuerza de movimiento que permitirá mover los eslabones sin problema alguno, estos motores ya cuentan con ENCODER integrado que servirá para su control de posicionamiento, estos motores también son de alta eficiencia y calidad.

Para evitar que los ejes recorran más de la distancia permitida debido a un error en su etapa de control o falso contacto que pueda presentarse, se utilizaran sensores de límite de carrera los cuales se posicionaran a los extremos de los ejes, también estos sensores servirán para posicionar a la maquina en su posición de HOME.

Para la medición de las vibraciones y estudio del efecto de la vibración en la calidad del corte se utilizarán módulos de acelerómetros analógicos los cuales estarán montados sobres las guías lineales de cada uno de los ejes.

4.2.3 Materiales donde se realizará la prueba de trayectorias

Debido a que nuestro diseño considera que el actuador final pueda ser cambiado de acuerdo con la necesidad del proyecto, este puede hacer pruebas de trayectorias con materiales que puedan cortar las herramientas de corte que porten los actuadores finales. Para este proyecto se realizará primero la prueba de trazado de trayectoria para observar el comportamiento de esta, por ello el actuador final será una herramienta de trazado ya sea pinceles, bolígrafos, etc; que trazaran sobre lienzos ubicados sobre la mesa de trabajo del banco de pruebas.

4.2.4 Guías lineales y transmisiones

Para el soporte principal de la mesa de trabajo y los ejes Z e Y, se utilizan guías lineales con flancos, el uso de este tipo de soporte facilita la instalación de estos debido a que ya cuentan con su sistema de sujeción y evita tener que adicionar más piezas para su sujeción a la estructura. El uso de este tipo de diseño de guía lineal es usado debido a que soporta una gran carga y no presenta deformaciones considerables.

Para la transmisión del movimiento y conversión de movimiento rotatorio a movimiento lineal, se utiliza un tornillo sin fin de bola de diámetro de 16 mm con un avance por vuelta de 5 mm, se usa este tipo de tornillo porque no presenta des ajustes por uso, tiene un movimiento más suave y preciso.

4.2.5 Programa y tarjeta de control

Para el control y generación de la trayectoria de corte se ha decidido trabajar con una ARDUINO MEGA debido al control simultaneo que se debe de tener con los 3 ejes y medio involucrados en el sistema. Esta tarjeta tiene una buena velocidad de trabajo la cual evitara perder el conteo de los pulsos del ENCODER o de realizar las tareas de manera lenta. El lenguaje de programación será C++, por ser compatible con la ARDUINO MEGA y su orientación de programación a objetos.

Para que el usuario pueda interactuar con la maquina y dar instrucciones y establecer parámetros necesarios para la trayectoria de corte, se creara un HMI en la herramienta de ayuda APPDESIGNER de MATLAB, en donde el programa establecerá una comunicación con la tarjeta de control, y será este quien determine las posiciones que debe de seguir la máquina.

ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

5. Dibujo de piezas

5.1 Componentes comerciales (metálicos)

Los componentes que se encargan de soportar las partes móviles formando la estructura principal del banco de prueba están dibujadas de acuerdo con el catálogo de la empresa PARKER, empresa dedicada a la producción de este tipo de material y accesorios. Las piezas que están dibujados de acuerdo con estos catálogos son las siguientes:

- Perfil de aluminio 28x28 IPS
- Escuadras de aluminio 20-2828M
- Tuerca T 20-055
- Tornillo con cabeza redonda 24-112

La figura 6 presenta el dibujo de un perfil de aluminio que será utilizado como soporte principal de la estructura.

Figura 6. Dibujo CAD perfil de aluminio 28x28 IPS. Fuente: Elaboración propia.

El objetivo de usar el catálogo de la empresa PARKER para realizar los dibujos es el uso de materiales estándar fáciles de conseguir ante cualquier desperfecto que llegase a ocurrir y bajo coste por su fabricación en serie, se tiene un respaldo y seguridad en la calidad de los productos al tener antecedentes de trabajo con este tipo de material. La empresa PARKER se encarga de dimensionar las piezas de acuerdo con las necesidades requeridas.

Los componentes que se encargaran de conformar los ejes del banco de pruebas están dibujados de acuerdo con el catálogo de la empresa NTN SNR, empresa dedicada a la fabricación de piezas para robots cartesianos. Las piezas que se dibujaron de acuerdo con este catálogo son los siguientes:

- Tornillo sin fin cuerda redonda con paso de 5mm.
- Tuerca para tornillo sin fin con paso de 5mm.
- Guía lineal con flanco
- Buje lineal especial para eje lineal con flanco.
- Soportes para tornillo sin fin.

La figura 7 presenta el dibujo de una flecha con rosca cilíndrica.

Figura 7. Dibujo flecha con rosca cilíndrica. Fuente: Elaboración propia.

5.2 Componentes diseñados de acuerdo con especificaciones

Algunas piezas por especificaciones y costes de venta en las distintas empresas dedicadas a la fabricación de componentes enfocados en robots cartesianos han sido diseñadas a la medida, esto implica que deberán de ser mandadas a maquinar en centros especiales de manufactura o impresos con materiales adecuados para soportar los esfuerzos mecánicos sin sufrir desperfecto alguno o estar en tolerancia para no interferir con la calidad de la pieza. Piezas que tendrán este tipo de diseño y fabricación son las siguientes:

- Mesa de trabajo eje X.
- Soporte de actuador final
- Calzas para nivelación de altura entre las guías lineales y tornillo sin fin.
- Soporte de motor a estructura
- Soporte de sensor de carrera
- Soporte de sensor de vibración

Estos materiales serán impresos en la impresora CREALITY 3 con material PLA, su impresión se realizará para los soportes de motores con un relleno completo debido a las fuerzas a la que estará sometido, mientras que los soportes de sensores llevarán un relleno del 50 por ciento, ya que no se someterán a esfuerzos importantes.

5.3 Componentes electrónicos

Para el control de movimiento, monitoreo de posición, lectura de vibraciones y seguridad en caso de accionamiento erróneos se han dibujado los siguientes componentes:

- Motor POLOLU 12 v con ENCODER rotacional.
- Acelerómetro
- Límite de carrera

La figura 8 presenta el dibujo del motor POLOLU que será el actuador de nuestro sistema en cada uno de los ejes.

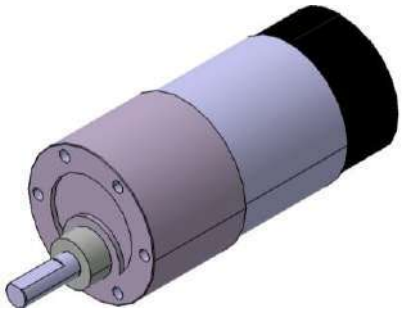


Figura 8. Dibujo CAD motor POLOLU 12 v. Fuente: Elaboración propia.

Los motores POLOLU irán acoplados a cada eje, siendo los responsables de generar el movimiento del sistema, el contar con los ENCODERS ya acoplados a los motores, permite ahorrar material en la fabricación de soportes para los ENCODERS y se ahorra la calibración de acople entre el motor y el ENCODER para tener una buena lectura de los pulsos.

Los acelerómetros estarán colocados en la plancha principal de trabajo y en el eje Z permitiendo tener lecturas de las vibraciones generadas al momento de probar las trayectorias de corte y ver como estas afectan la calidad de las piezas maquinadas.

Los límites de carrera irán montados sobre los soportes de estos mismos, los cuales a su vez se anclarán a las guías lineales sobre sus flancos en los extremos dejando la mayor distancia de recorrido posible en los ejes del banco de pruebas.

6. Integración de piezas

Con todas las piezas dibujadas a usar se realiza la integración en el entorno de ASEMBLY del software CAD, para poder empezar con la integración de las piezas se establece como punto de anclaje uno de los perfiles que conforman la base principal de la estructura, a partir de este perfil se construye la base del sistema conformada por cuatro perfiles de aluminio unidas entre ellos mediante las escuadras de aluminio y la tornillería y roscas tipo T correspondientes por cada lado de la base. Esta base será también la que en físico estará sujeta al piso para evitar deslices al momento de su funcionamiento.

Se opta por una estructura en forma de cuadrado en donde se montará el eje X, para el armado de este eje se colocan dos soportes lineales a cada lado y en medio de ellos el tornillo sin fin, los ejes lineales tienen sobre ellos los bujes lineales, así como el tornillo sin fin tiene su tuerca. Tanto bujes como la tuerca del tornillo se conectan con la mesa de trabajo del eje x. El armado del eje X de esta forma permite que la distancia entre las guías lineales pueda ser variado de acuerdo con la necesidad que se presente, tal como se muestra en la figura 9.

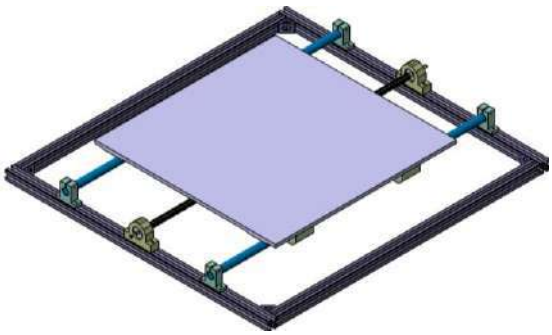


Figura 9. Integración base eje X. Fuente: Elaboración propia.

Para la construcción del eje Y se utilizan dos perfiles de aluminio (con altura de 40 cm) unidos entre ellos por otros dos perfiles de aluminio para dar mayor rigidez a la estructura de estos ejes. El anclaje de estos ejes con respecto a la base principal será mediante 4 escuadras colocadas de a 2 por cada perfil que unirán al eje Y con la base principal.

Sobre los perfiles de aluminio que dan la altura al banco de pruebas se montan los ejes lineales, así como el soporte del tornillo son fin (estas piezas se montan en ambos perfiles de aluminio). Al igual que con el eje X se hace uso de bujes lineales y tornillo sin fin para conformar este eje y su anclaje a su mesa de trabajo correspondiente.

Para finalizar el eje Z se montan sobre la mesa de trabajo del eje Y, y al igual que con los demás ejes se montan los soportes y tornillos sin fin para construir dicho eje. Sobre la mesa de trabajo del eje Z se montará el actuador final tal como se muestra en la figura 10.

Una vez se tienen las dos integraciones (soporte principal y soportes eje Y y Z), se integran en uno solo, el acople de las dos previas integraciones se realiza mediante las escuadras que se indicaron en la integración del eje Y, estas escuadras se acoplan a la estructura principal. El realizar el ensamble de esta manera permite poder mover el soporte del eje Y a una posición deseada y dejarla estática en dicha posición, el resultado la estructura final del sistema es presentada en la figura 11.

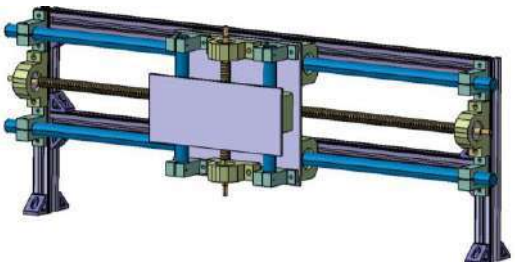


Figura 10. Integración eje Z e Y. Fuente: Elaboración propia.

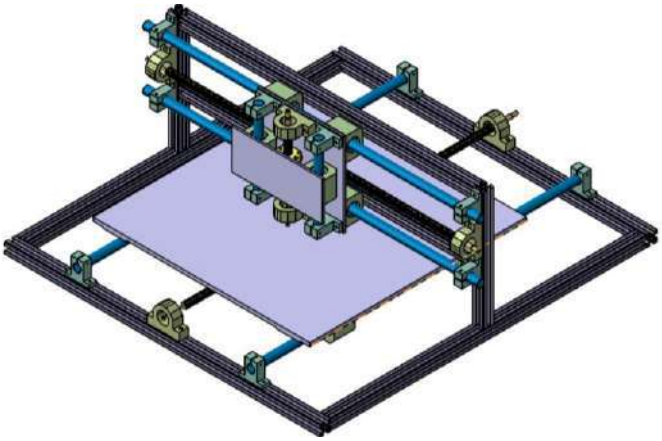


Figura 11. Integración final del sistema. Fuente: Elaboración propia.

7 RESULTADOS

Se dio una breve introducción a la problemática a trabajar en este articulo; como esta pretende ser atacada para dar solución a la misma y que se espera obtener como resultado. Se realizado la investigación de los sistemas típicos basados en robots cartesianos comparando los funcionamientos y aplicaciones de cada uno.

Se establecieron los requerimientos del sistema y las causas del porque se tienen esos parámetros; así como la descripción de los materiales a utilizar tanto estructurales como electrónicos, seleccionados de acuerdo con los requerimientos y características del sistema; y de donde se han tomado las medidas que se utilizan para tener una medida de referencia. Se dio una clasificación de cómo serán adquiridas o fabricadas las piezas de acuerdo con su disposición.

Se dibujaron las piezas a utilizar en el diseño del sistema basadas en catálogos de fabricantes para los tres ejes involucrados en el movimiento del sistema. Se logró la integración de estas en dos secciones (parte inferior y superior) para después tener una integración total del sistema en el entorno ASSEMBLY del SOFTWARE CAD. Como resultados se obtuvieron los siguientes puntos:

- Diseño de la estructura de un sistema robótico XYZ adecuado para el corte o perfilado de materiales basado en componentes comerciales.
- Visualización previa del sistema antes de su armado en físico gracias al dibujo de las piezas por medio de catálogos o diseño propio.
- Obtención del número total de componentes a utilizar para la construcción con lo cual se puede realizar la cotización de los materiales.
- Integración de las piezas en el modulo ASSEMBLY con el cual se podrán realizar pruebas de esfuerzo y simulación de movimientos para conocer los limites de carga y detectar si existen colisiones.

Se hace una primera simulación de movimiento mediante la aplicación de un polinomio de tercer orden el cual dicta las posiciones que deben de seguir los actuadores XY:

$$q_{(t)} = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

Figura 12. Polinomio de tercer orden. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 13 se presenta la posición de uno de los ejes del robot; en la figura número 14 se presenta la velocidad del eje Y. finalmente en la figura número 15 se presenta la aceleración del eje Y. El tiempo de simulación se da desde un tiempo inicial en cero hasta los 30 segundos. Las constantes del polinomio se han dejado en valores unitarios con el fin de observar el comportamiento y funcionamiento de la simulación del eje.

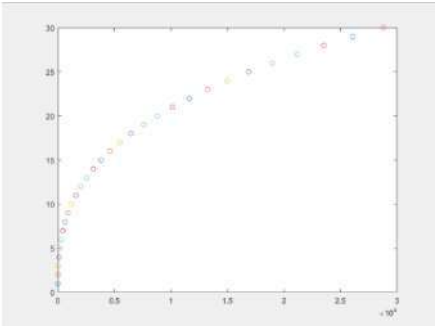


Figura 13. Posición eje X. Fuente: Elaboración propia.

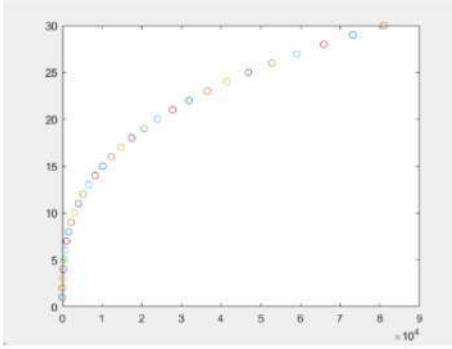


Figura 14. Velocidad eje X. Fuente: Elaboración propia.

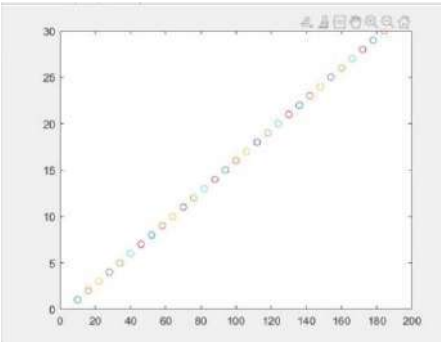


Figura 15. Aceleración eje X. Fuente: Elaboración propia.

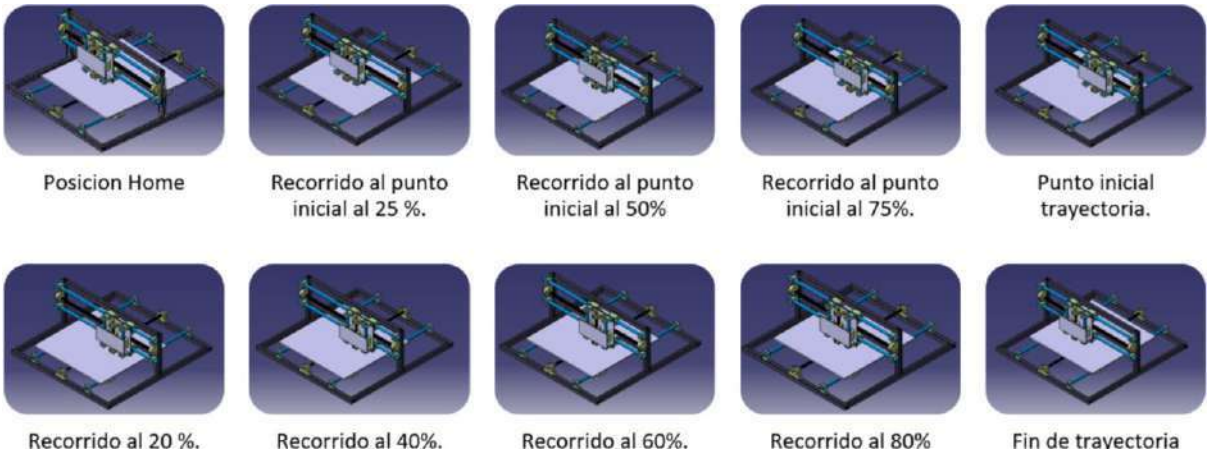


Figura 16 Banco de imágenes de la vista isométrica del movimiento del robot. Fuente: Elaboración propia.

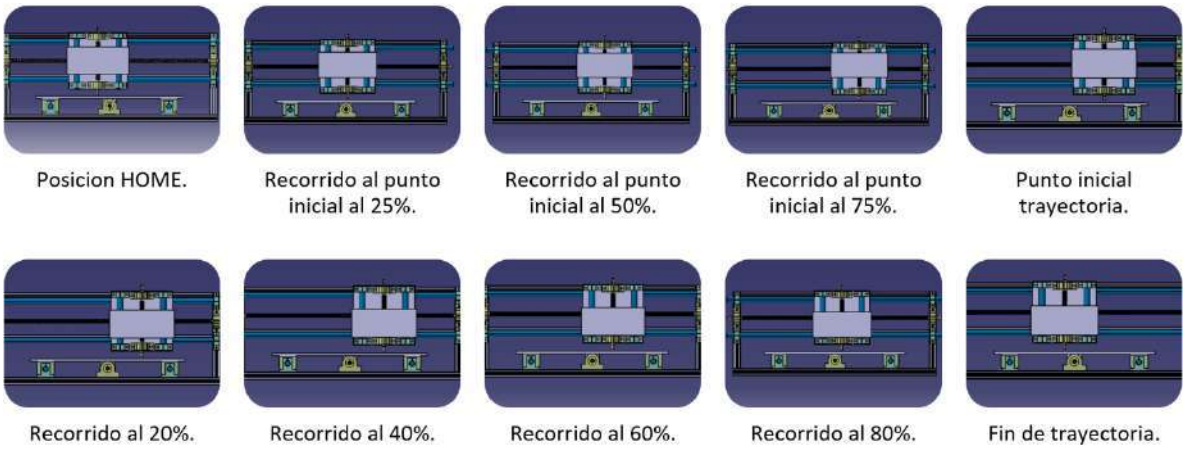


Figura 17 Banco de imágenes de la vista frontal (eje Y) del movimiento del robot. Fuente: Elaboración propia.

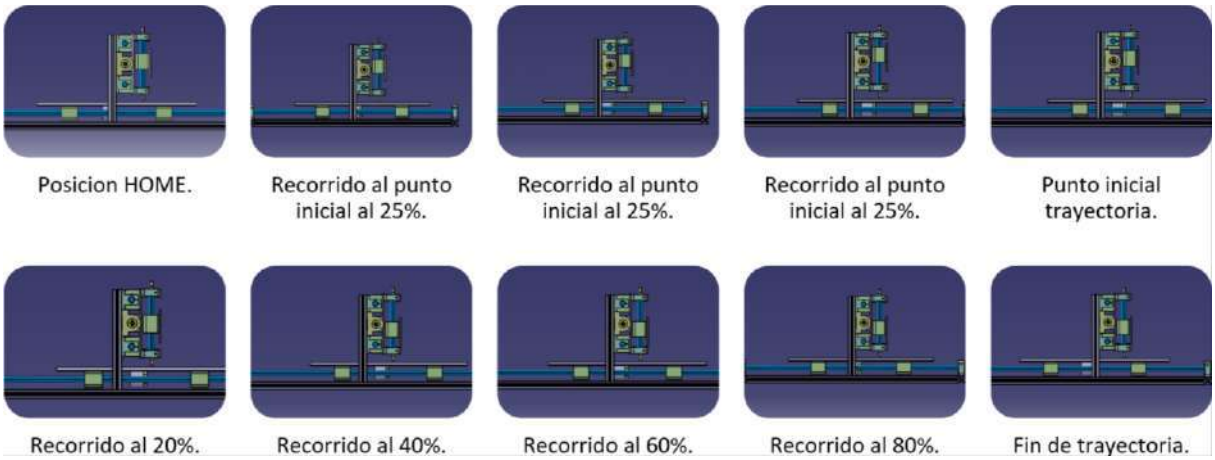


Figura 18 Banco de imágenes de la vista lateral (eje Z) del movimiento del robot. Fuente: Elaboración propia.

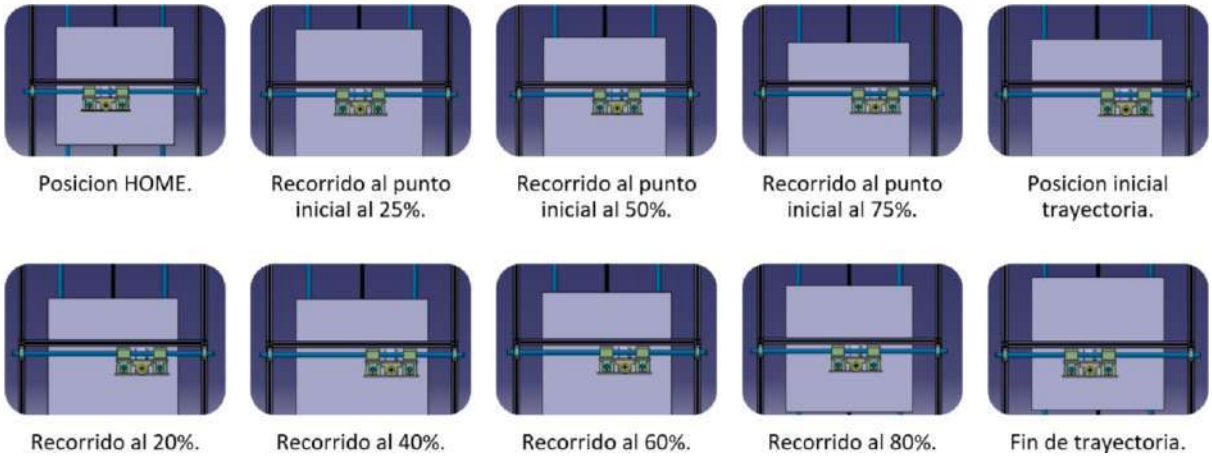


Figura 19 Banco de imágenes de la vista superior (eje X) del movimiento del robot. Fuente: Elaboración propia.

8. Conclusiones

En este trabajo se presentó el diseño de una estructura libre para la prueba de trayectorias de corte que permita cambiar las características del sistema de acuerdo con el tipo de necesidad que se tenga, haciendo uso de materiales disponibles en el mercado o con la facilidad de fabricarlos según sea el requerimiento especifico de la pieza. Se tiene un conocimiento mas a fondo de las piezas involucradas al buscar las características de estas y como deben de ensamblarse.

Los componentes involucrados en el sistema fueron seleccionados de acuerdo con disponibilidad en el mercado y características físicas del componente Permitiendo aumentar o disminuir la cantidad de dinero invertido según sea necesario la dimensión de la estructura. Esta metodología también permite adquirir conocimiento de las piezas involucradas gracias al dibujo y ensamble en software CAD.

Se realizaron los dibujos e integraciones de los 3 ejes involucrados en el movimiento del sistema, para lo cual se realizó una investigación de sistemas típicos en los cuales podríamos basar nuestro diseño. Con esta integración se puede tener una visualización previa del banco de pruebas que permite realizar modificaciones en el diseño antes de su armado en físico,

Con este diseño de estructura se realizan pruebas de movimiento y esfuerzo para conocer los límites de carga que puede soportar nuestra estructura sin sufrir daño significativo, la velocidad de movimiento que alcanzara nuestro sistema y tolerancia requerida para evitar tener flexiones significativas en la trayectoria de corte que afecte la calidad del corte.

Referencias

[1] L. E. B. Arriciaga, diseño y construccion de un robot cartesiano para el corte de modelos 3d de poliestireno, quito: escuela politecnica nacional, 2021.

[2] F. B. Aguilar, diseño de un robot cartesiano para una aplicación industrial de paletización y desarrollo de pruebas preliminares, valencia: universidad politécnica de valencia, 2019.

[3] H. Prieto, «Estrategias avanzadas de fresado en 3 ejes con CAMWORKS,» 04 05 2021. [En línea]. Available: https://intelligy.com/blog/2021/05/04/estrategias-avanzadas-de-fresado-en-3-ejes-con-camworks/.

[4] R. D. G. Hernández, Diseño y modelamiento de un robot cartesiano para el, BOGOTÁ D.C.: Universidad de La Salle, 2007.

[5] J. L. Arevalo, «Automatizacion de un Sistema Manual ´,» Instituto Politecnico Nacional , Ciudad de México, 2013.

[6] C. L. R. Rodríguez, diseño y construcción de un robot cartesiano, bogotá d.c: universidad libre, 2017.

[7] M. A. G. Olvera, desarrollo y puesta en marcha de un robot cartesiano,, queretaro,qro: centro de ingenieria y desarrollo tecnológico, 2018.

[8] I. Fernández, «comprameahora,» 2023. [en línea]. Available: https://comprameahora.com.

[9] A. F. F. Salas, «diseño de un perfil de movimiento trapezoidal a la implementación,» 1universidad nacional de colombia, bogota, colombia, 2022.

[10] L. A. P. Gonzalez, «prototipo de robot serie de bajo costo con fines,» de *trabajo de diploma*, cuba, universidad central “marta abreu” de las villas, 2021, p. 63.

[11] I. M. Mata, diseño, construccion y control de un robot, ciudad de méxico: universidad nacional de méxico, 2007.

[12] J. F. N. Herrera, rediseño del robot cartesiano del laboratorio de, quito: escuela politécnica , 2019.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 25, pp. 319 – 334
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Análisis estructural de una silla de ruedas para una movilidad sin asistencia

Torres González Mauricio, Arriaga Arriaga Cesar Augusto
y Gómez Pavón Luz del Carmen

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.
mauricio.torresg@alumno.buap.mx

Resumen

La silla de ruedas es uno de los elementos de movilidad más utilizados por las personas con discapacidad motriz, brinda un apoyo de movilidad para la población que la tiene limitada, y una silla de ruedas eléctrica brinda una independencia para los usuarios ya que no dependen de un tercero que los ayude con su movimiento. El diseño de esta silla de ruedas eléctrica está enfocado a cumplir las normativas nacionales e internacionales, además de adaptarse a la antropometría del mexicano, es decir, su estatura y peso, los cuales son diferentes de los pobladores del mundo. La selección de materiales y el diseño está enfocado a cumplir las necesidades del usuario en un diseño modular, es decir, por piezas independientes y que son validadas con la ayuda de las herramientas computacionales, en este caso, software de diseño y simulación implementando el Método del Elemento Finito.

Palabras clave: Silla de ruedas, método del elemento finito, Von Mises, mallado, límite elástico, desplazamientos, PTR

1. Introducción

El concepto de discapacidad ha evolucionado a lo largo del tiempo, se ha dejado de percibir como algo negativo, ha evolucionado el concepto de tal manera, que se define como una limitante para la integración de las personas en su entorno social o su comunidad, esto de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud la discapacidad motriz es una de las discapacidades más comunes [1], en México, con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía por sus siglas INEGI, reporta en su último censo de población que el 5.7% de la población censada presenta dificultades para moverse y por lo tanto realizar sus actividades [2].

De acuerdo con la OMS la silla de ruedas es uno de los medios de asistencia de uso más frecuente para mejorar la movilidad personal [1], por lo cual tener un dispositivo como este, brinda una mejor calidad de vida, ya que ayuda a los usuarios a realizar sus actividades de una manera más activa, sin embargo, las sillas de ruedas manuales aún presentan el inconveniente de que el usuario dependa de alguien más que le facilite los traslados o de su misma fuerza.

Es por lo que toma relevancia el uso de una silla de ruedas eléctrica, ya que facilita la tarea del usuario para su desplazamiento, en el mercado existen opciones las cuales se presentan en la tabla 1, la principal característica de estos es su diseño, el cual, se basa en lo plegable presentando una ventaja al momento de ser transportadas, ya que su espacio de almacenamiento se reduce a la mitad. Sus materiales pueden ser más ligeros como el aluminio, pero si no se tiene un correcto manejo de la estructura, puede ocasionar fracturas estructurales o dobleces que, en el caso del aluminio y las fibras de carbono y vidrio, resultan difíciles de reparar o que se cambie la pieza dañada por una nueva, lo que ocasiona un costo extra al usuario.

Tabla 1. Ejemplos de sillas de ruedas eléctricas disponibles en el mercado

Marca y modelo	Características
Yuwell- Silla De Ruedas Eléctrica Ultraligera Aluminio Plegable Lujo [3]	Base de aluminio. Soporta hasta 100 kg. Pesa 22 kg. Velocidad máxima: 6 Km/h. Autonomía de 20 Km.
Silla de Ruedas Eléctrica Titán [4]	Material: Estructura de acero esmaltado. Soporta: 135 kg. Alcance máximo 24 km. Peso: 72 kg
Silla de ruedas Izzy Go [5]	Peso: 68 kg. Soporta hasta: 136 kg. Velocidad máxima: 6.4 Km/h.
Ortopedia Ana- Silla de ruedas eléctrica recargable con respaldo plegable y descansa brazos, tapicería en color negro [6]	Soporta hasta 100 kg. Pesa 42 kg. Esmaltada en gris plata para un aspecto moderno y resistencia a la corrosión.
Powercar- Powerchair [7]	Velocidad máxima: 6 Km/h. Autonomía 20 Km. Soporta hasta 90 kg. Peso: 50 kg.

Sin embargo, entre las distintas opciones presentadas, el asiento no brinda un soporte en la zona de la lumbar y se tiene que corregir con aditamentos extra, tales como cojines o por otro asiento, lo que representa un gasto extra para el usuario, por lo que un buen diseño que cumpla con todas estas características es fundamental, un diseño modular nos permite agregar o quitar características del producto para que se adapte de la mejor manera al usuario y así tenga una autonomía en su desplazamiento, de tal manera que este trabajo se basa en generar un diseño que se adapte a la morfología del usuario mexicano, que sea resistente a los esfuerzos generados por el usuario y los que se generan en los motores y la tracción de las llantas, implementando el Método del Elemento Finito (MEF) para validar el diseño y los materiales propuestos para la construcción del prototipo.

2. Criterios de diseño

El diseño de una silla de ruedas debe de cumplir ciertos criterios de diseño, no basta que sea una silla con ruedas y que se mueva sin algún control o seguridad, debe cumplir normativas que estandaricen sus diseños, las velocidades máximas que deben alcanzar los dispositivos para que sean seguros para el usuario, que sus dimensiones se adapten al usuario y a los espacios públicos del lugar donde van a transitar, además que se tiene que considerar al usuario final, ya que un mal diseño provocaría que no pueda adaptarse a realizar sus actividades y por lo tanto siga dependiendo de un tercero que le facilite las cosas, además que la morfología de una persona mexicana es distinta a la de un usuario de otro país, pues no se cuentan con las mismas características de estatura y peso, por lo cual estos elementos se vuelven importantes al momento de realizar un diseño.

2.1 Normativas Nacionales e Internacionales

El diseño de una silla de ruedas es un proceso que debe estar reglamentado, es decir que debe existir un estatuto por los cuales los diseñadores y los fabricantes de sillas de ruedas se guíen, ya que los diseños tienden a variar de un lugar a otro y no siempre se siguen las mismas técnicas y materiales, principalmente en la elaboración de sillas de ruedas manuales, es por ello que en 2008 la OMS publicó un manual con una serie de pautas para la elaboración y suministro de sillas de ruedas manuales en entornos de bajos recursos, en los cuales menciona los criterios de diseño que debe tener una silla de

este estilo, sin embargo, al ser sillas de ruedas manuales, no se pueden aplicar todos estos conceptos al diseño de una silla de ruedas eléctrica.

Al leer este manual se encuentra una información de normativas que ellos siguieron, y es donde se menciona la ISO 7176 [8], una normativa internacional vigente que en sus distintos capítulos, tales como en la ISO 7176-2 [8] donde se mencionan las pruebas a las que se somete la silla de ruedas para determinar la estabilidad, en la ISO 7176-6 [8] menciona la velocidad máxima de una silla de ruedas eléctrica cargando una persona, no debe ser mayor a 15 Km/h, por lo cual es de suma importancia conocer esta norma y sus dintintos apartados, principalmente los relacionados a las sillas de ruedas eléctricas, pues se sigue en todo el mundo.

En México no existe una Norma Oficial que esté dedicada a la fabricación de sillas de ruedas, sin embargo, para propósitos de este trabajo, se seguirán las normas de espacios públicos de los servicios de salud mencionados en la NOM-030-SSA3-2013 [4], en la cual nos menciona las dimensiones de anchura que debe tener un espacio como la entrada de un lugar o la rampa de acceso.

2.2 *Antropometría del mexicano*

El ser humano ha ido evolucionado a lo largo de la historia, siempre influido por el entorno donde se desarrolle, de esto que sus características físicas sean diferentes en cada región, por lo que su desarrollo no ha sido el mismo en todos los lugares del mundo y esto se observa en las características propias de cada país, para el caso de México, la estatura y peso promedio de una persona adulta masculina es de 170 centímetros y 79.3 kilogramos [5], y para una persona adulta femenina es de 157 centímetros y 70.7 kilogramos [5].

Otro estudio realizado a la población mexicana, con campo de análisis a la población de la zona metropolitana de Guadalajara, arrojó datos de la población adulta trabajadora industrial de 18 a 65 años, las dimensiones de los individuos sentados, la longitud nalga-poplíteo, es decir, la distancia mayor comprendida de la parte más posterior de la nalga (glúteo) y el hueco poplíteo con el sujeto en posición sedente [6], para el sexo femenino 471 milímetros [7], y para el sexo masculino la longitud fue de 476 milímetros [7], además otro parámetro que se mencionó en el estudio es la longitud promedio de la cadera sentada de una persona de sexo masculino es de 374 milímetros [7], y en el sexo femenino es de 399 milímetros [7].

2.3 Método del elemento finito

El método del elemento finito (MEF) es un procedimiento que se realiza mediante un software de análisis el cual permite obtener respuestas ante los distintos problemas de ingeniería, principalmente a los relacionados con esfuerzos en las distintas piezas diseñadas y su comportamiento con distintos materiales, con el fin de obtener la información necesaria para escoger el material que mejor se adapte a las necesidades del producto.

El MEF funciona dividiendo la geometría de la pieza sometida a cargas y restricciones en partes más pequeñas conocidas como elementos [8], los cuales pueden ser de distintas geometrías, cuadrados, triángulos o círculos según sea el caso, por lo que se vuelve una cantidad finita de elementos que están unidos mediante sus vértices, conociendo a esto como malla, la precisión de los análisis realizados bajo este método se verán afectados de acuerdo al número de nodos de la malla, el tamaño y los elementos de esta, cuanto menor sea el tamaño de los elementos y mayor la cantidad de estos, el resultado será más preciso [8].

2.4 Límite elástico de los materiales

El límite elástico de un material se define como aquel en el cual un material puede ser estirado sin sufrir de daños permanentes en el tamaño o en la forma del material [9]. Cada material tiene su límite elástico definido por distintas pruebas realizadas en las distintas normativas vigentes, tales como la ASTM E139-11 la cual menciona los métodos de ensayo estándar para la realización de ensayos de

fluencia, fluencia-rotura y tensión-rotura de materiales metálicos [9], entre otras, las cuales varían entre cada material.

Estos conceptos mencionados son importantes para entender el diseño de una silla de ruedas, ya que sin las medidas antropométricas del usuario no es posible determinar las medidas de la base y del asiento que se utilizarán en el diseño final para que el usuario tenga la comodidad necesaria para realizar sus actividades sin depender de nadie para el desplazamiento, además de que se deben cumplir las normativas nacionales principalmente con la distancia óptima por la cual la silla transitará en los espacios públicos, pero estos criterios se conocerán mejor en la siguiente sección.

3. Diseñando el modelo

Como ya se mencionó, el diseño tiene que cumplir con los estándares indicados en las normativas y en las dimensiones del usuario promedio mexicano, debido a que los productos extranjeros no se adaptan de la mejor manera a los usuarios en el país, por lo que se optó realizar el diseño en dos partes, la primera parte corresponde a una base con geometría cuadrada en la base superior e inferior, y una geometría rectangular en los laterales de la base.

Los elementos de base inferior y superior son un marco estructural de base cuadrada de 500 milímetros de lado, con un refuerzo estructural cruzado en los vértices interiores del perfil tubular cuadrado de acero de 1 pulgada por 1 pulgada de cara, como se muestra en la figura 1.

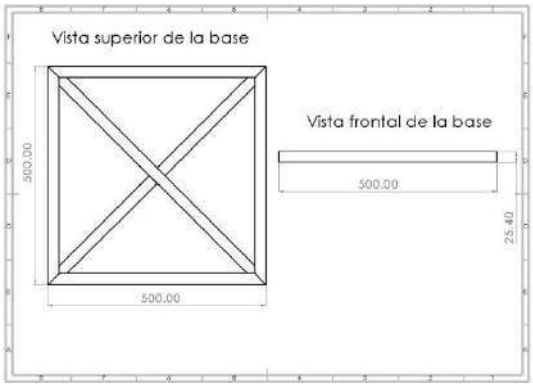


Figura 1. Planos de la base de la caja.

Para los laterales de la base se considera una altura que unirá base inferior con base superior, para que la altura final de la estructura sea de 350 milímetros, la vista lateral de la base se presenta en la figura 2, donde se observa un reforzamiento estructural cruzado en los vértices interiores.

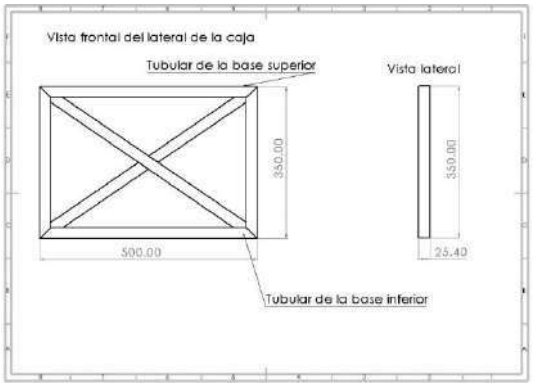


Figura 2. Planos del lateral de la caja base.

Finalmente, en la parte posterior de la caja, solo se aplicará un refuerzo estructural cruzado en los vértices interiorespara que se mantenga fija la caja base a los esfuerzos de los movimientos laterales ocasionados por el giro de la estructura, como se observa en la figura 3.

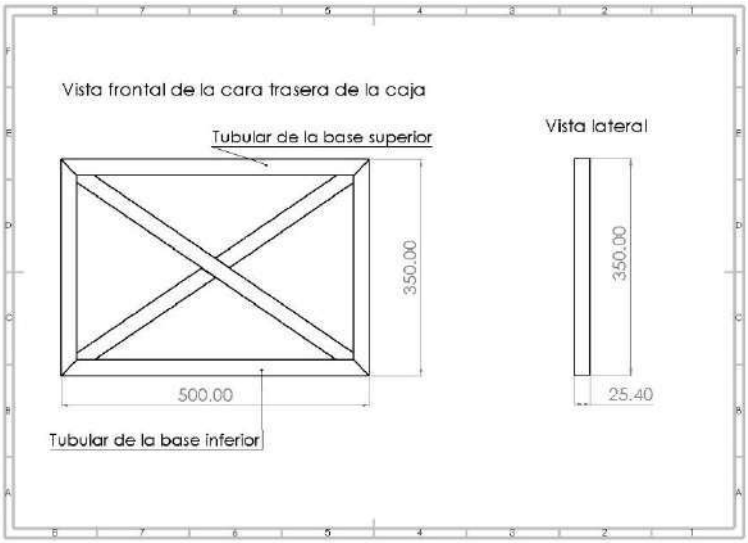


Figura 3. Plano de la vista trasera de la caja base.

Otros elementos que se agregan a la parte estructural de la caja base, son dos láminas, una galvanizada en la parte interior de la caja, que ayudará a cargar los elementos que componen la silla de ruedas, tales como los motores, su respectivo centro de control y potencia, y un tren motriz, el cual está diseñado con la finalidad de que la dirección del movimiento sea más precisa y no se dependa únicamente de la activación y desactivación de los motores, por lo que el diseño final de la base se observa en la figura 4.

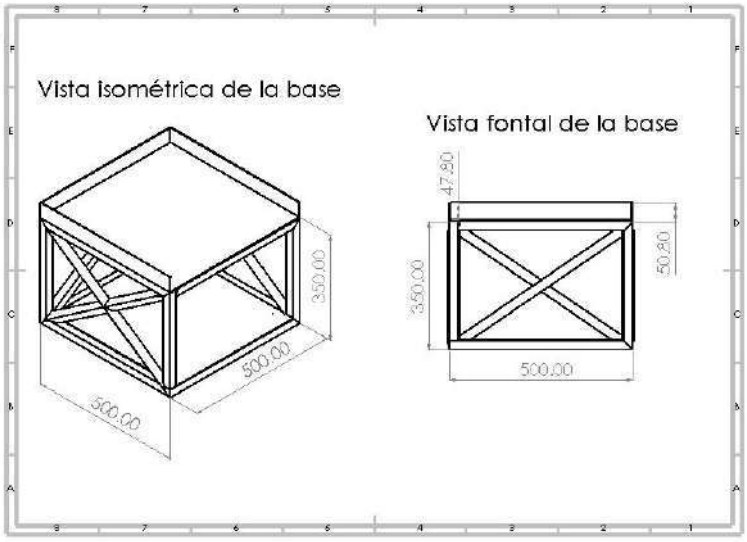


Figura 4. Vista del plano de la caja base.

La finalidad de realizar un diseño de esta manera tiene como objetivo que sea esta parte de la base soportará de una manera importante el peso del usuario, además de que cargará con la potencia

y propulsión del sistema del sistema, los motores y a su etapa de alimentación y control, cuyo promedio de peso se calcula en 40 kilogramos.

3.1 Otras piezas del sistema

La otra parte del sistema que es importante es el asiento en el que reposa el usuario, por lo que también es importante que sea una superficie cómoda y que tenga una buena adaptación al ancho de la cadera, sin importar si es del sexo masculino y femenino, debe ser funcional para ambos casos, por lo que el diseño se muestra en la figura 5.

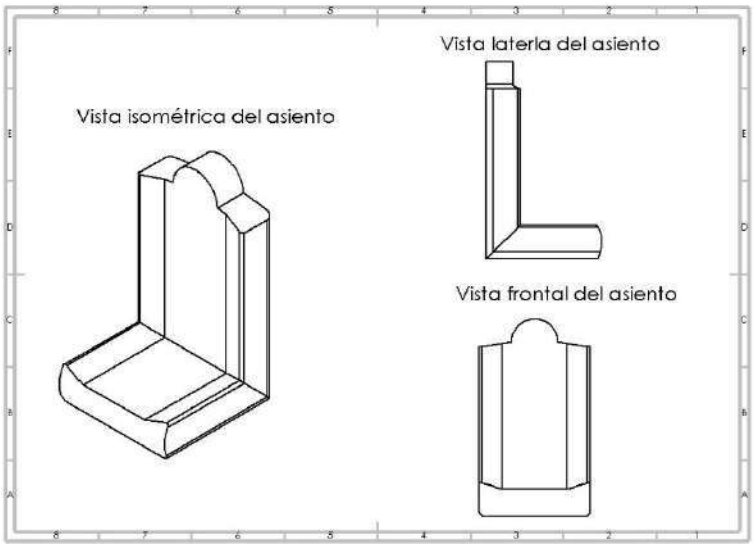


Figura 5. Plano del asiento

Otros elementos que componen a la silla de ruedas eléctrica son las ruedas, en este caso se seleccionaron cuatro ruedas de caucho imponchable de 10 pulgadas de diámetro y tres pulgadas de ancho, las cuales son de gran utilidad ya que no tendrán pérdida de presión de aire y no son susceptibles a pinchaduras permitiendo un desplazamiento sin riesgos por distintas superficies sin que tenga que remplazarse en un momento inoportuno para el usuario, el modelo CAD se observa en la figura 6.

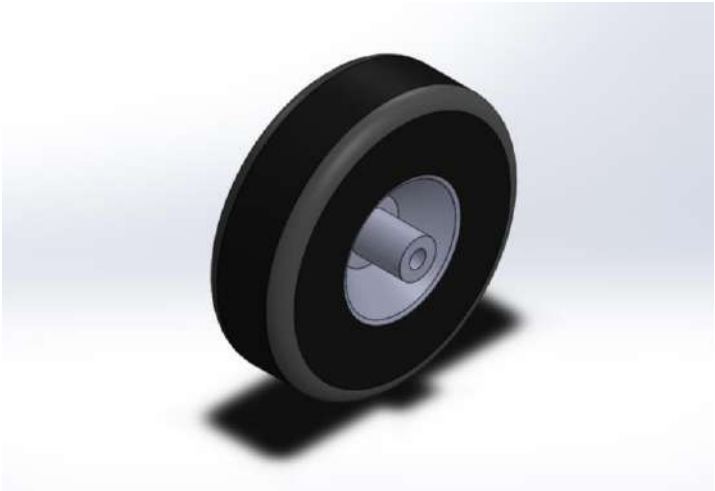


Figura 6. Imagen CAD de la rueda propuesta

La propuesta de los motores para el mecanismo consiste en un par de motores de la marca Electrocraft, de 24 V y un consumo de corriente máxima de 80 A, con una potencia máxima de 950 W de acuerdo a la hoja de datos y un torque máximo de 109.9 Newtons-metro, de acuerdo con la información del fabricante [10], la imagen del modelo utilizado se observa en la figura 7.

Figura 7. Motor MP36 de Electrocraft [10]

El diseño final de la silla propuesto para un usuario con un peso máximo de 100 kilogramos se observa en la figura 8, en donde se integran los elementos más importantes para el funcionamiento de esta, siendo la base, el asiento, las ruedas y los motores, además del control de dirección que como en otros modelos, será un control tipo joystick, debido a la precisión que presenta en el movimiento y la sensibilidad de este, además que no requiere mayor esfuerzo para realizar su movimiento.

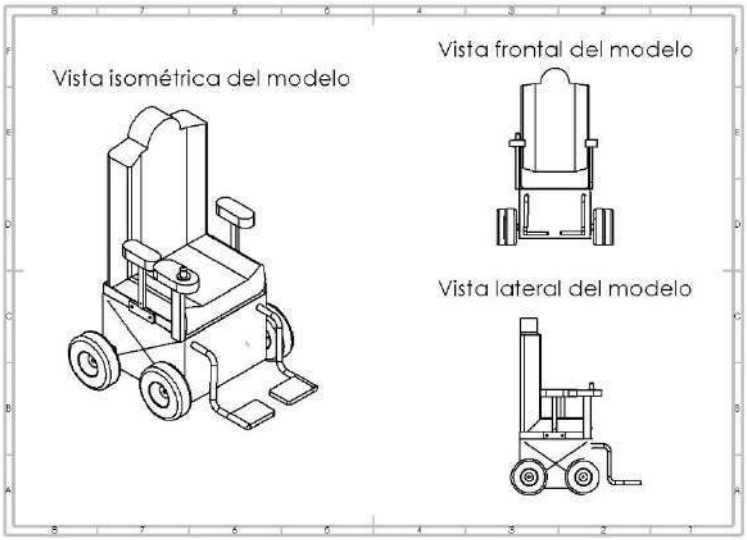


Figura 8. Plano del diseño de la silla de ruedas

En la figura 9 se observa el modelo CAD elaborado en el software de diseño Solidworks ®, cuyas herramientas de diseño, facilitan la tarea de diseño, además de que permiten simular las condiciones de esfuerzos a las que las piezas se verán sometidas, con el fin de validar o no el diseño propuesto.

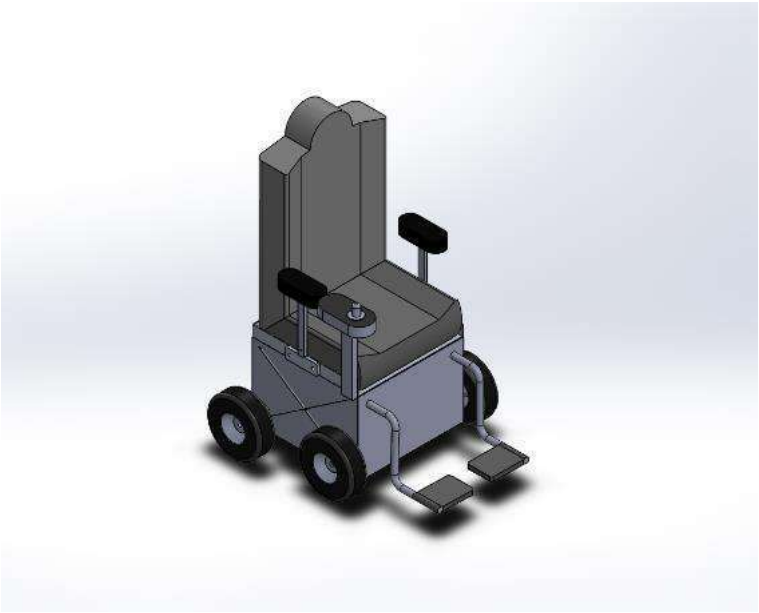


Figura 9. Modelo CAD del diseño propuesto

4. Aplicación del MEF a las piezas del diseño.

Para validar el diseño y evitar las pruebas destructivas que suelen ser muy costosas, se utilizó el software de diseño Solidworks® que, en su complemento de simulación, nos permite conocer el comportamiento de las piezas ante esfuerzos que se les asignan, como carga, presión, torsión, entre otros.

Se mencionó previamente que la pieza más importante del diseño es la caja base, ya que en ella se van a concentrar los esfuerzos debido al peso del usuario como del sistema de control y la unidad de potencia de la silla de ruedas, por lo que en la base inferior se propone una carga de hasta 60 kilogramos, a la estructura de perfil tubular cuadrado propuesta se le agregó una lámina galvanizada de un espesor de 1.5 milímetros, con el fin de se puedan acomodar los elementos mencionados de la etapa de potencia y control, como se observa en la figura 10a, en la figura 10b se observa que se agregó una geometría fija en las aristas inferiores del modelo de la base, representado con flechas verdes, mientras que la distribución de la carga propuesta se representa como las flechas magentas.

Figura 10a. Vista del modelo base/lámina.

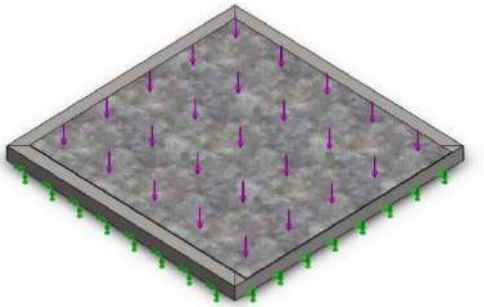


Figura 10b. Modelo con las sujeciones y la carga

Otra prueba que se debe realizar es en la caja completa principalmente en su base superior, ya que es la parte en la que el usuario va a reposar, a esta parte de igual manera se le agrega una lámina de aluminio de 3 milímetros de grosor, en la cual irá colocado el sillón del asiento, para este estudio se

le agregará una geometría fija en la base y una carga de 150 kilogramos representando el peso máximo al cual el prototipo será sometido, en la figura 11 se muestra el modelo, las flechas verdes representan la geometría fija a lo largo de las aristas y las flechas magenta representa la distribución de la carga

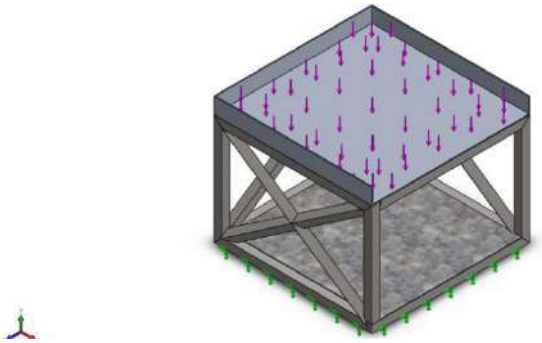


Figura 11. Vista del modelo con la geometría fija y la carga.

Finalmente, otra prueba que se debe realizar a esta estructura es la que se verá sometida la estructura en los movimientos de las vueltas generadas por el motor, cuya capacidad de carga es de 109 Nm, por lo que se simula de igual manera este esfuerzo, aplicado a un solo lateral de la estructura, fijando la parte frontal de la silla con la geometría fija representada con las flechas verdes y la carga representada con las flechas magentas al costado de la caja base, como se observa en la figura 12.

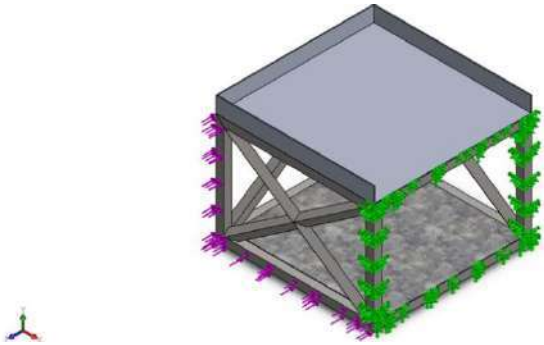


Figura 12. Vista del modelo con la geometría fija y la carga lateral.

5. Resultados

Ya definidos los parámetros de fijación y las cargas a las que serán sometidas las piezas, el siguiente paso en el simulador es crear la malla geométrica que representa el modelo en partes finitas, con el fin de obtener un resultado más fiable mientras más elementos contenga y sean más pequeños, esta malla se adapta al modelo y a su simetría.

5.1 Resultados obtenidos en la base inferior y la lámina.

Esta pieza de la base inferior es la que corresponde a la carga de los componentes relacionados a la potencia del sistema, es decir, deberá cargar con los motores, las baterías y su sistema de control, por lo que debe soportar una carga constante, los resultados del mallado del modelo obtenidos se muestran en la figura 13 los puntos más obscuros de la imagen se deben a dos perforaciones que contiene la lámina galvanizada para fijar otros elementos.

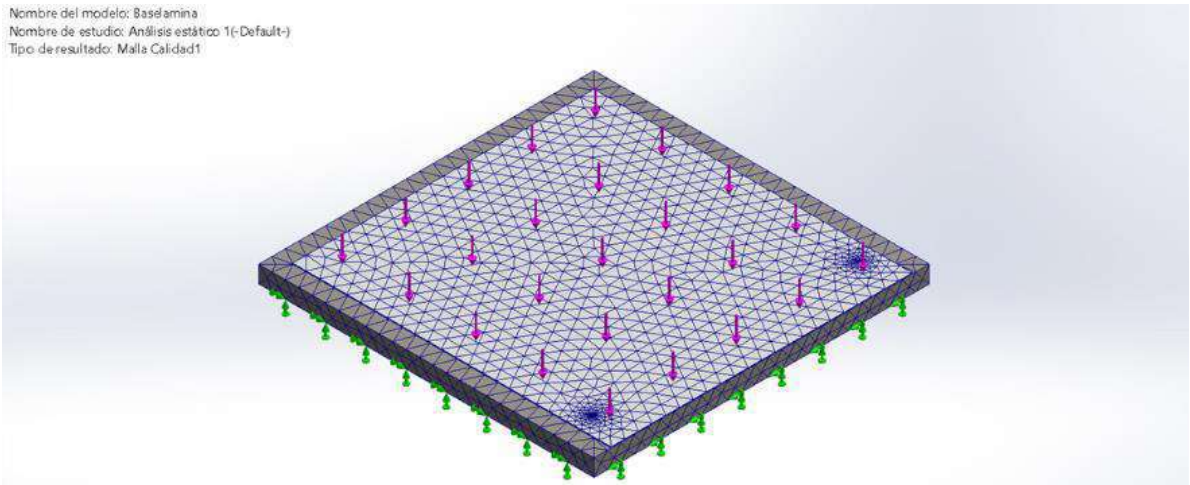


Figura 13. Mallado del elemento a simular

En la figura 14 se presentan los resultados obtenidos de los desplazamientos que los materiales experimentarán, se observa que en la parte alta de la base y en los laterales hay un desplazamiento máximo de 0.56 milímetros hacia abajo, lo cual no es un movimiento que pueda considerarse significativo puesto que es una de las partes en las que el refuerzo estructural cruzado no acaba de cubrir en la superficie de la lámina, no se tiene considerado que lleve una carga tan grande en esa parte.

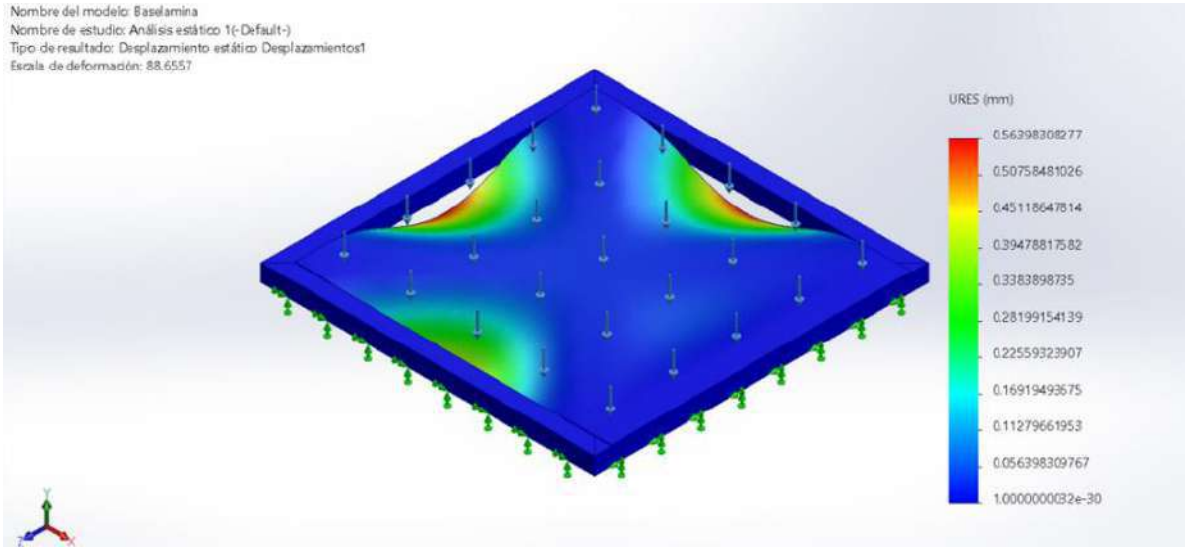


Figura 14. Resultado de desplazamientos del modelo.

Con este resultado se puede determinar que el modelo es seguro pues los desplazamientos que sufre el material a una fuerza como esta son mínimos, sin embargo, es necesario conocer el criterio de Von Mises, que nos permite conocer si las capacidades elásticas del material son las adecuadas, por lo que los resultados no deben superar su límite elástico, para la lámina galvanizada no debe exceder el valor de 203 943 242.6 N/m^2 y para el acero su límite elástico es de 206 807 000 N/m^2, el resultado obtenido fue de 19 012 282 N/m^2 en su tensión de máxima indicado en la escala de la figura 15, por lo que es un valor muy por debajo de los límites elásticos de los materiales propuestos.

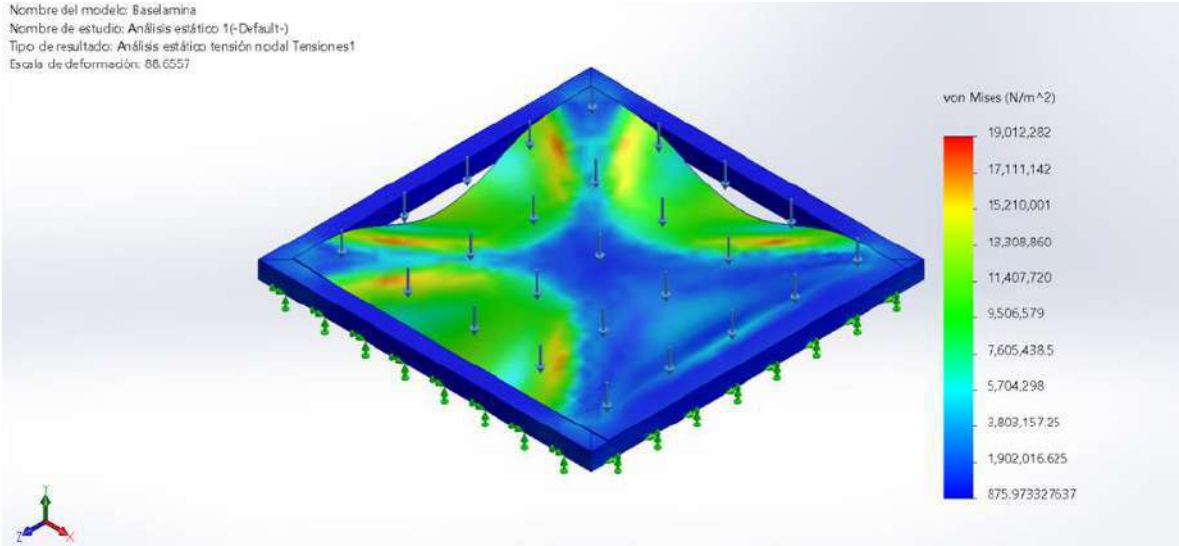


Figura 15. Resultados bajo el criterio de Von Mises

Otro resultado que es importante conocer es el factor de seguridad, en este caso calculado bajo el criterio de Von Mises en el que el resultado es el esfuerzo realizado en la pieza sobre el límite elástico del material y este resultado debe ser mayor a 1, de lo contrario los esfuerzos aplicados deformarían el material permanentemente y lo llegarían a quebrar, para el caso del estudio realizado su criterio del factor de seguridad mínimo es de 11 como se observa en la figura 16, es decir que se requerirá de una fuerza 11 veces mayor a la aplicada para que el material presente un quiebre.

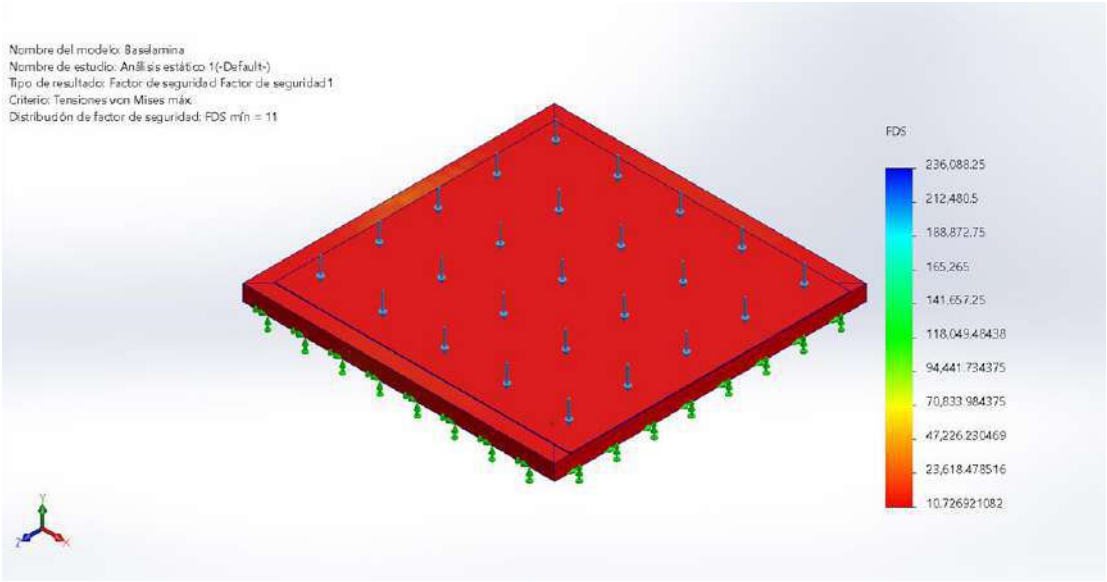


Figura 16. Resultados del factor de seguridad

5.2 Resultados obtenidos en la caja base y el asiento

En esta parte del diseño, los esfuerzos se concentrarán en la parte superior de la caja base y en la lámina para el asiento debido a que cargará con el peso del usuario, para ello se deben concentrar la carga máxima, en este caso, 150 kilogramos, que es más del doble promedio del peso del mexicano, con estos resultados se analizará la viabilidad del diseño, en la figura 17 se observa el mallado del elemento del que se obtendrán los resultados de esfuerzos.

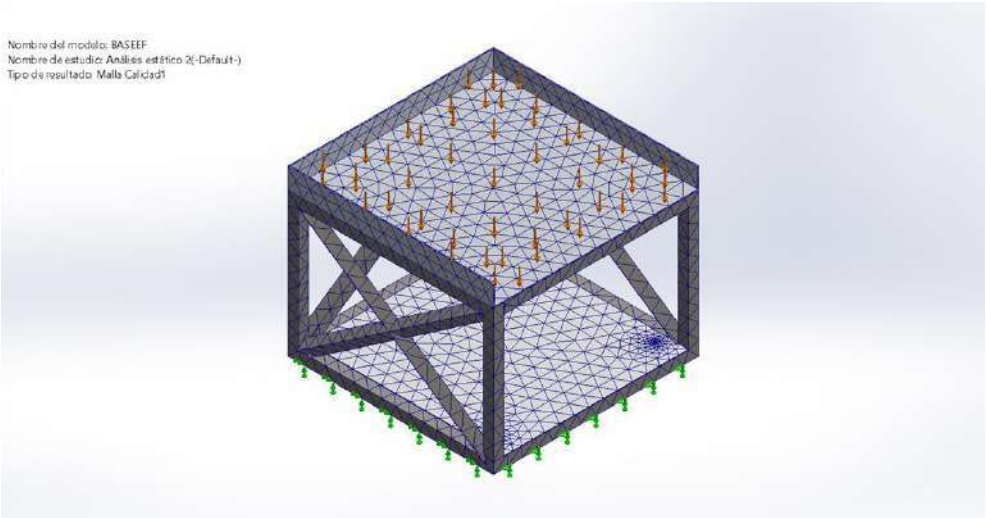


Figura 17. Mallado del modelo

De igual manera el primer resultado obtenido es el de los desplazamientos en el modelo, ya que esto nos indica qué tanto se deforman las piezas con la carga simulada, en este caso en las zonas en rojo, el desplazamiento máximo obtenido es de 0.08 milímetros, incluso con una carga mayor a la base inferior, los desplazamientos en la zona del asiento son prácticamente mínimos, ya que no logra la deformación más allá de un milímetro en los tubulares laterales y en la lámina del asiento, por lo que estos dos elementos sirven de soporte para el peso máximo del usuario, estos resultados se observan en la figura 18.

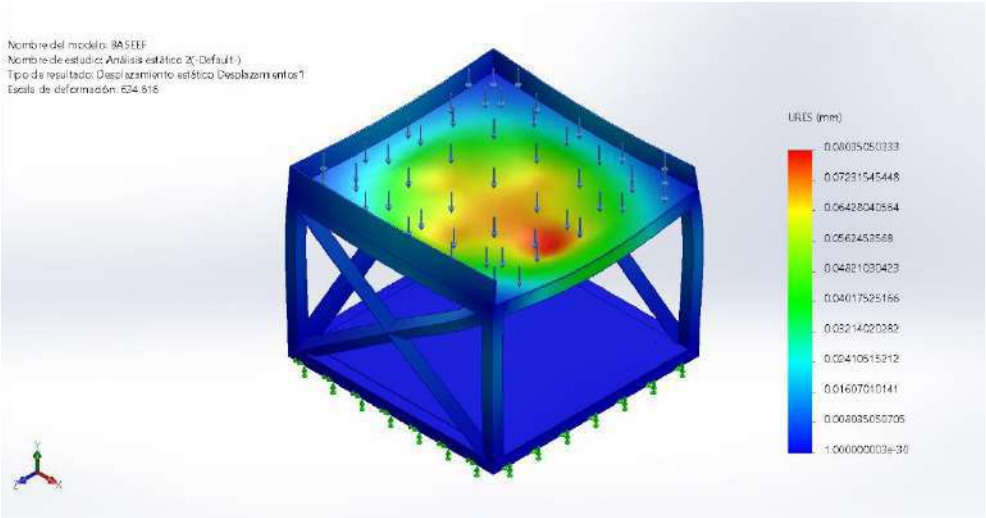


Figura 18. Resultados de desplazamientos del modelo

Otro resultado obtenido es el de las tensiones de Von Mises, los resultados deben concentrarse por debajo del límite elástico de los materiales, para la lámina de aluminio su límite elástico es de 34 500 00 N/m^2 y para el acero es de 206 807 000 N/m^2, el resultado obtenido en su escala máxima de tensiones es de 40 024 436 N/m^2, un valor que se encuentra por debajo del límite elástico del acero, sin embargo es mayor al del aluminio, pero para este caso el software se encarga de concentrar ambos límites elásticos para obtener el resultado que se presenta como un promedio de ambos valores, el resultado se observa en la figura 19.

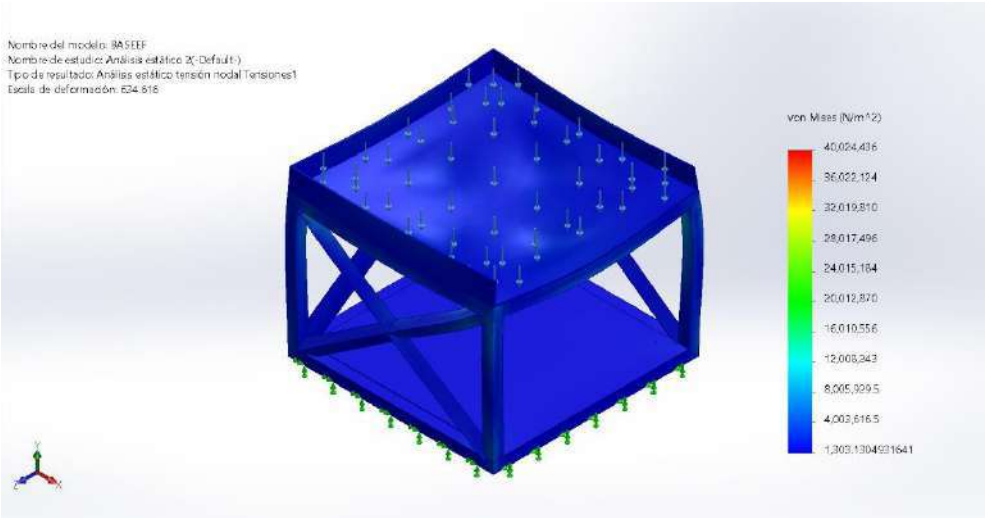


Figura 19. Resultados de las tensiones de Von Mises

Finalmente, el factor de seguridad que se obtuvo de este estudio fue un valor de 8.8, como se mencionó previamente el valor del factor de seguridad bajo el criterio de Von Mises siempre debe ser mayor a 1 debido al resultante obtenido entre el esfuerzo aplicado y el límite elástico del material, el resultado del factor de seguridad mínimo obtenido es de 8.8, es decir que se requiere una fuerza 8.8 veces mayor a la aplicada para que el modelo presente un quiebre, el resultado obtenido se observa en la figura 20, y el modelo se considera seguro para un peso de 150 kilogramos.

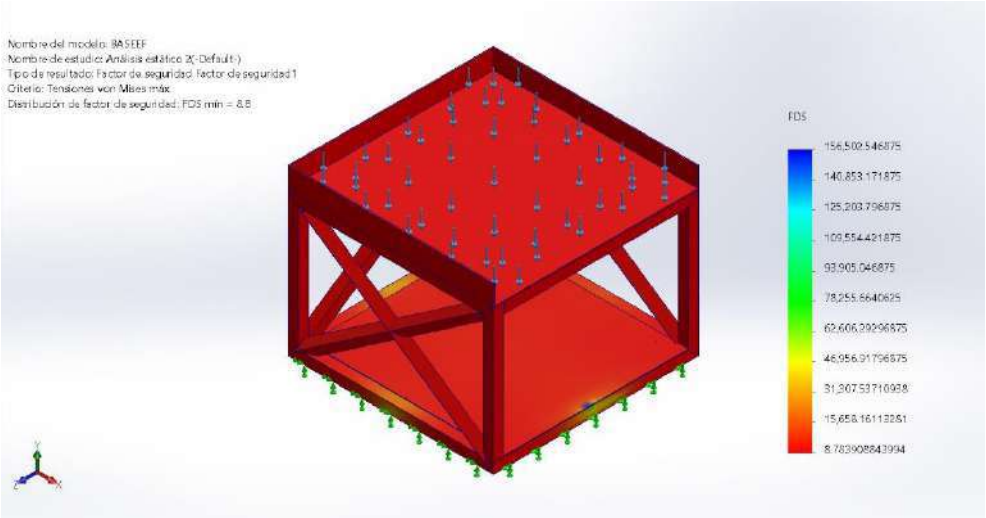


Figura 20. Resultados del factor de seguridad

5.3 Prueba de esfuerzos lateral

Para asegurar que la base soporta los esfuerzos generados por el giro del motor, se hizo esta prueba, en la que se fija la parte frontal del modelo y se aplica una fuerza de 109 Nm que es la potencia máxima del motor, por lo que debe resistir una fuerza lateral, el mallado de este modelo es el mismo que en la figura 17. En los resultados de desplazamientos se observa que su desplazamiento máximo es de 0.006 milímetros, es decir un valor inferior a un milímetro, por lo que no representa una deformación considerable en las partes donde se aplica la fuerza, por lo tanto, resiste en gran medida este esfuerzo, como se observa en la figura 21.

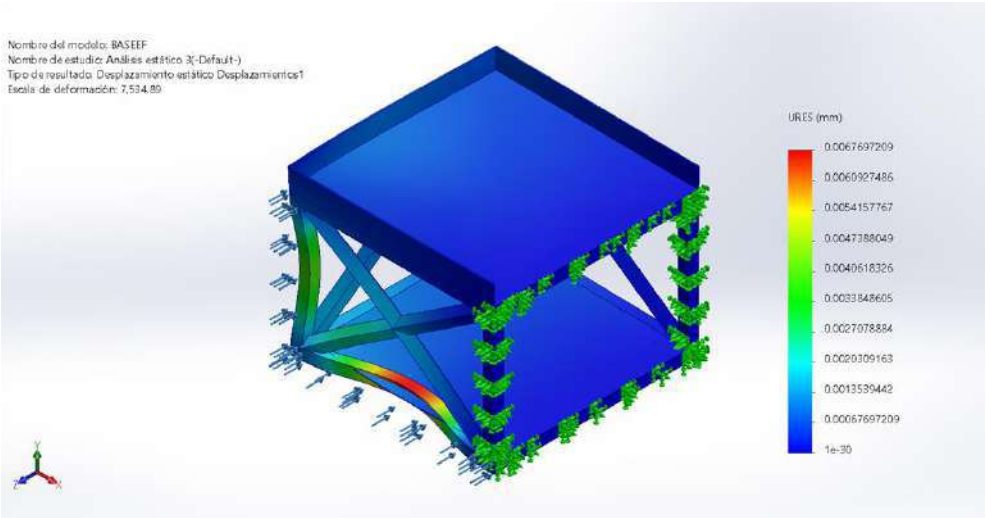


Figura 21. Resultados de los desplazamientos

En los resultados obtenidos bajo el criterio de Von Mises, se observa que los esfuerzos de tensión están muy por debajo del límite elástico del material en este caso para el acero es de 206 807 000 N/m^2, el resultado obtenido en su tensión máxima es de 4 401 715 N/m^2 por tanto, esta fuerza no presenta un peligro para el límite elástico del material y para la estructura que se mantiene sin ninguna alteración esto se observa en la figura 22.

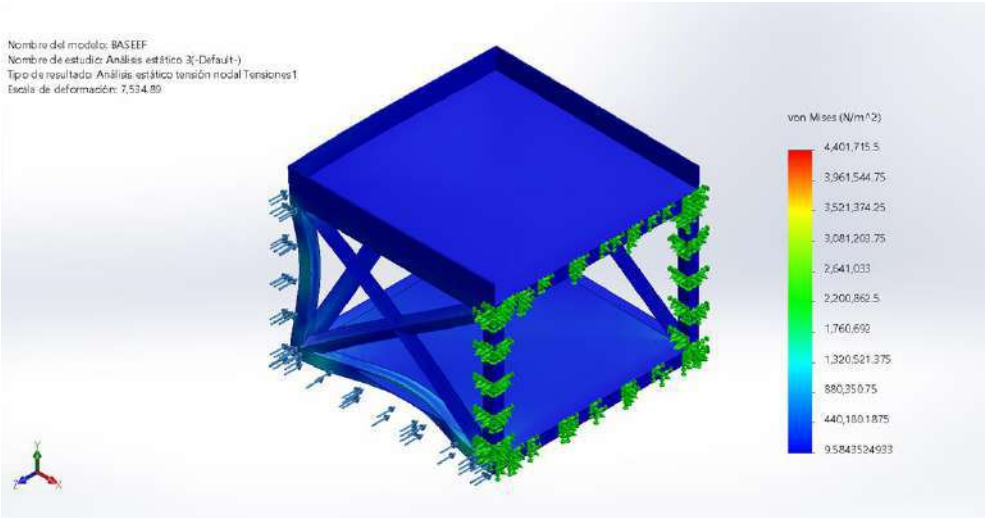


Figura 22. Resultados de las tensiones de Von Mises

Finalmente en la figura 23 se observa que el valor del factor de seguridad mínimo bajo el criterio de Von Mises en el que la fuerza aplicada entre el límite elástico del material, su valor debe ser mayor a uno para que se considere seguro, en el caso de la estructura con la fuerza aplicada lateralmente es de 80, es decir que se requiere una fuerza de 80 veces a la aplicada para que la estructura presente una rotura en el material, por la fuerza aplicada a la pieza y analizada, el resultado obtenido proporciona una garantía de seguridad ante el esfuerzo lateral aplicado.

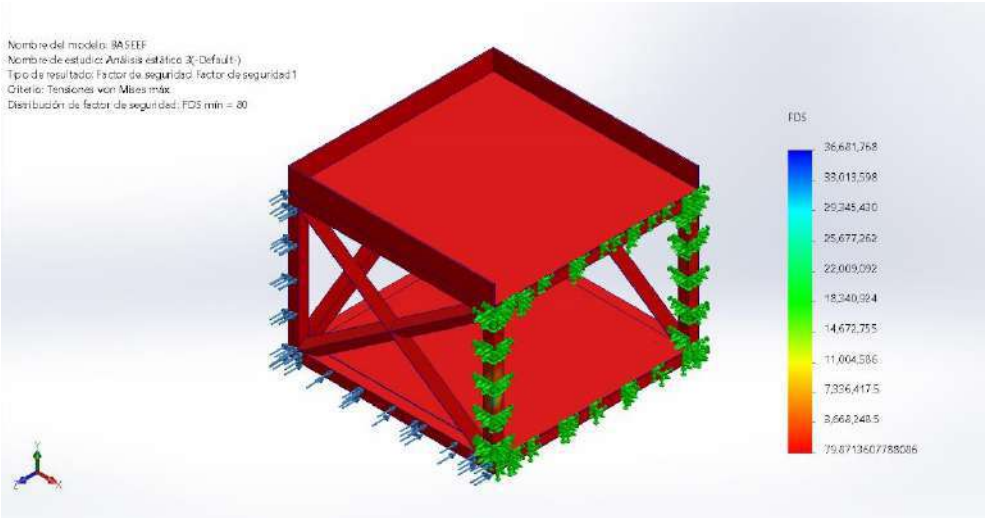


Figura 23. Resultados del factor de seguridad.

La intención de realizar un diseño modular brinda la posibilidad de cambiar elementos o rediseñar los refuerzos estructurales si fallan en las pruebas de seguridad realizadas por el MEF, en este caso la base de la silla de ruedas presenta resultados que validan que la estructura propuesta resistirá la carga de transportar un usuario cuyo peso sea mayor al del promedio del mexicano, es decir más de 80 kilos en promedio, y la estructura elaborada con el perfil tubular cuadrado tiene desplazamientos casi imperceptibles en la base superior donde descansará el usuario y en la base inferior que cargará con la etapa de potencia del sistema.

6. Conclusiones

Un diseño modular como el presentado permite detectar a tiempo los problemas surgidos para el usuario y que se puedan corregir a tiempo, además que lo deja abierto a una mejora continua del producto, conforme vaya avanzando la tecnología de los materiales y de los componentes, en este diseño el material es popular para muchas aplicaciones de la vida cotidiana, como sillas, mesas, etcétera, una aplicación más como la silla de ruedas eléctrica suma a la amplia variedad de cosas que se pueden construir con un perfil tubular rectangular o PTR y que sigue demostrando que sus características son las idóneas para la construcción de elementos como los ya mencionados.

El diseño debe adaptarse al usuario, en este caso la población mexicana adulta, en un rango de edad de 18 a 78 años, que es la esperanza de vida en el país, por lo cual se consideraron las medidas antropométricas de la población en ese rango de edad, los 50 centímetros de ancho de la caja base permite permanecer dentro del rango de anchura que deben tener los espacios públicos en el sistema de salud que es de al menos 90 centímetros de ancho, además de adaptarse a las longitudes de la cadera de las personas sentadas sin importar el sexo del usuario.

El uso del perfil tubular cuadrado de una pulgada de cara tiene la finalidad de brindar una resistencia en el diseño ante los distintos esfuerzos presentados, de carga del usuario y del sistema de potencia, como se observó en la parte de resultados, además que este estilo de perfil permite tener una estructura más liviana que si se hiciera con un perfil cuadrado sólido de las mismas dimensiones por lo que en el futuro y conforme vayan evolucionando los materiales se hará un diseño que se adapte a las mismas características de resistencia y que sea aún más liviano que el presentado en el trabajo.

Finalmente se sigue trabajando en que el diseño modular se siga adaptando a otras necesidades de traslado y control que se implementará en trabajos posteriores, pero sin duda esta base permitirá tener otra opción para los usuarios de las sillas de ruedas eléctricas y que en sus módulos se agreguen o quiten piezas de acuerdo con las necesidades de cada usuario.

Referencias

[1] W. H. O. a. others, Pautas para el suministro de sillas de ruedas manuales en entornos de menores recursos, Ginebra: Biblioteca de la OMS, 2008.

[2] I. N. d. E. y. Geografía, «Estadísticas a propósito del día internacional de las personas con discapacidad (datos nacionales),» Comunicado de prensa, 2021.

[3] D. Solutions, «Doctor Solutions,» 2023. [En línea]. Available: https://www.doctorsolutions.com.mx/MLM-1412940461-silla-de-ruedas-electrica-ultraligera-aluminio-plegable-lujo-_JM#position=11&search_layout=grid&type=item&tracking_id=7f617903-5a9d-4885-b968-be2f499aad29. [Último acceso: 25 09 2023].

[4] Sillasderuedas.com, «Sillasderuedas.com,» 2023. [En línea]. Available: http://www.sillasderuedas.com/silla-de-ruedas-electrica-titan.html. [Último acceso: 25 09 2023].

[5] M. C. México, «Medi Care México,» 2023. [En línea]. Available: https://medicare.mx/producto/silla-de-ruedas-electrica-con-respaldo-tipo-automovil-izzy-go. [Último acceso: 25 09 2023].

[6] A. México, «amazon.com.mx,» 18 Mayo 2019. [En línea]. Available: https://www.amazon.com.mx/el%C3%A9ctrica-recargable-respaldo-plegable-tapicer%C3%ADa/dp/B07S3GHNQ9. [Último acceso: 25 09 2023].

[7] Powercar, «Powerchair,» 2017. [En línea]. Available: https://www.powercar.com.mx/silla-de-baterias. [Último acceso: 25 09 2023].

[8] I. O. f. Standardization, *ISO 7176- 1, 2, 3, 6, 13,* Suiza: ISO copyright office, 2017.

[9] S. d. Salud, *NORMA Oficial Mexicana NOM-030-SSA3-2013, Que establece las características arquitectónicas para facilitar el acceso, tránsito, uso y permanencia de las personas con discapacidad en establecimientos para la atención médica ambulatoria y hospitalaria del S,* Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación, 2012.

[10] D. Mundial, «datosmundial.com,» 2023. [En línea]. Available: https://www.datosmundial.com/estatura-promedio.php. [Último acceso: 21 Agosto 2023].

[11] S. A. G. Vázquez, M. G. Ibarra y J. A. Guerra, «Perfil antropométrico de la población del estado de Chihuahua,» *CULCYT, CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA,* vol. 56, nº 1, pp. 198-207, 2015.

[12] R. Avila-Charaurand, L. Prado-León y E. González-Muñoz, Dimensiones antropométricas de la población latinoamericana: México, Cubla, Colombia, Chile, Universidad de Guadalajara: D.R., 2007.

[13] G. Mirlisenna, «Blog ESSS,» ESSS, 16 Enero 2016. [En línea]. Available: https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/. [Último acceso: 25 Agosto 2023].

[14] I. Physics, «Base de conocimientos,» Industrial Physics, 2023. [En línea]. Available: https://industrialphysics.com/es/base-de-conocimientos/articulos/pruebas-de-limite-elastico/#:~:text=El%20l%C3%ADmite%20el%C3%A1stico%20se%20define,una%20deformaci%C3%B3n%20permanente%20del%20material.. [Último acceso: 25 Agosto 2023].

[15] E. H. Corporation, «MP36 Right-Angle Gearmotor,» 2023. [En línea]. Available: https://www.electrocraft.com/products/gearmotors/MP36/. [Último acceso: 15 Agosto 2023].

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 26, pp. 335 – 349
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Diseño de un mecanismo para la estimación de la distancia en un arreglo binocular estereoscópico

Flores Mena José Eladio. (1), Michua Camarillo Antonio. (1),
Flores Flores Juan Pablo. (2) y Aragón Mayo Laura Lidia.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (1)
Wolfram Research Inc. (2)
laura.aragon@alumno.buap.mx

Resumen

En la actualidad el mundo está experimentando cambios tecnológicos abruptos debido al desarrollo de la inteligencia artificial (IA) [1, 2, 3]. Una disciplina que se beneficia y al mismo tiempo auxilia a la IA es la visión por computadora o visión artificial, la cual últimamente se ha desarrollado gracias al progreso de los procesadores y la disponibilidad de bastas bases de datos. Una de las tareas más importantes para las que se utiliza la visión artificial es la estimación de la profundidad. Si bien esta tarea ha sido explorada por bastante tiempo, aun representa un área en desarrollo. Así, en este trabajo se plantea la construcción de un arreglo binocular estereoscópico para la estimación de la profundidad o la distancia a la que se encuentra un determinado objeto. El arreglo en cuestión consta de un par de cámaras USB montadas sobre una base que permite modificar la separación entre las cámaras (línea base) con la ayuda de un motor. Para ubicar un objeto de interés en la imagen se propone experimentar con tres técnicas de detección de objetos: Segmentación de color, Haarcascades y Redes Neuronales Convolucionales. La implementación de estas técnicas y su incorporación junto con el arreglo binocular propuesto se realiza con la ayuda del Sistema Operativo Robótico (ROS). Los resultados obtenidos por cada una de las técnicas de detección de objetos son analizados y las conclusiones respectivas son presentadas al final de este trabajo.

Palabras clave: profundidad, visión artificial, disparidad, binocular, proceso, visión tridimensional, .

1. Introducción

La visión es uno de los sentidos humanos más importantes y depende de ella alrededor del 70% de la información que los humanos reciben sobre su entorno. El sistema visual humano, como el de muchos animales, funciona con dos ojos, formando la llamada visión binocular. Al almacenar y registrar las imágenes que representan las diferencias entre cada ojo, el cerebro es capaz de interpretar la realidad y percibir la profundidad. Dado que el sistema visual humano es uno de los más desarrollados de la naturaleza, el cerebro tiene otras señales para percibir las escenas 3D tal como son; la perspectiva, la interposición o solapamiento, el enfoque y la disparidad.

Por tanto, la visión artificial o visión por ordenador puede entenderse como el campo científico que confiere a las máquinas la capacidad de "ver" su entorno y extraer de él información útil. Es decir, un conjunto de técnicas que utilizan los dispositivos electrónicos para recopilar, analizar y procesar información visual con el objetivo de proporcionar a las máquinas información adicional que les permita realizar tareas más complejas. En un sistema de visión binocular artificial esta discrepancia se puede calcular mediante una triangulación, para posteriormente determinar la profundidad a la que se encuentra un objeto de interés. Para la identificación de objetos es necesario explorar diferentes técnicas de detección. De tal manera que en este trabajo se propone explorar las técnicas de Haarcascades, Redes Neuronales Convolucionales y por segmentación de color.

2. Visión artificial

Se sabe que de entre las distintas capacidades sensoriales que poseen los seres vivos, la visión es de las más importantes, y en muchos casos, la más importante. Esto se debe a que la información visual es sumamente útil para diferenciar entre el día y la noche, percibir distancias, detectar potenciales amenazas en el entorno, orientarse y en general, para navegar [4].

La visión artificial o visión por computadora es un campo científico destinado para automatizar el proceso visual. Captura y procesa imágenes digitales de varias formas. Se entiende por manipulación de imágenes y técnicas de manipulación de imágenes todas las técnicas realizadas sobre imágenes con el objetivo de extraer información, eliminar perturbaciones y mejorar la calidad y conservación de las imágenes digitales. El desarrollo del campo del procesamiento de imágenes ha crecido significativamente. Su interés se basa en dos áreas de aplicación principales. Mejore la calidad de la interpretación humana y procese datos en la escena para la percepción automática de las máquinas. Por tanto, la visión artificial o visión por ordenador puede entenderse como el campo científico que confiere a las máquinas la capacidad de "ver" su entorno y extraer de él información útil. Es decir, un conjunto de técnicas que utilizan los dispositivos electrónicos para recopilar, analizar y procesar información visual con el objetivo de proporcionar a las máquinas información adicional que les permita realizar tareas más complejas.

Actualmente, la visión por computadora es utilizada principalmente para desempeñar las siguientes tareas

- Clasificación de imágenes: Consiste en determinar si una imagen contiene algún objeto que pertenezca a una categoría específica. Por ejemplo, determinar si en la imagen hay un auto, sin importar su modelo, color, tamaño, etc.
- Detección o localización: Busca determinar la ubicación de un objeto dentro de la imagen, es decir, establecer las coordenadas de dicho objeto dentro de la imagen. Esto se puede hacer para uno o varios objetos en la imagen.
- Identificación de objetos: Esta es una tarea muy similar a la anterior, excepto que se hace para objetos únicos. Por ejemplo, identificar el rostro de una persona o el logotipo de una compañía en particular
- Segmentación de imágenes: Consiste en determinar qué región o regiones de la imagen pertenecen a un mismo objeto.
- Seguimiento de objetos: Esta tarea ubica un mismo objeto a lo largo de una serie temporal de imágenes, es decir, localiza un objeto en movimiento.

En la actualidad, los sistemas de visión artificial se implementan en su gran mayoría en aplicaciones estáticas para reconocer formas, colores y control de calidad. El acople de dichos sistemas a robots móviles viene siendo tratado enfrentando grandes complicaciones como los cambios repentinos del entorno, luminosidad, obstáculos, las diversas condiciones ambientales y de trabajo.

Con el fin de tener una imagen idéntica al entorno real, es necesario generar imágenes estereoscópicas que nos permita obtener la profundidad y así conseguir una representación en 3D. El fenómeno estereoscópico consiste en adquirir imágenes a través de ambos ojos simultáneamente. Aunque estas imágenes corresponden a la misma escena, existen ciertas diferencias entre las imágenes debido a la distancia entre los ojos. Como resultado, una imagen cambia claramente con respecto a la otra. Este cambio se conoce como paralaje retiniano y el cerebro lo interpreta como una medida de profundidad [4].

La visión artificial interna capturar información relevante del medio ambiente, usando cámaras como sensores de ciertas características. Así como los ojos en el sistema visual del ser humano, en un sistema de visión artificial, son las cámaras digitales los dispositivos encargados de capturar la luz que reflejan los objetos que son iluminados por una o más fuentes de radiación para posteriormente generar una imagen. En una cámara digital, la luz recibida se hace incidir sobre un sensor fotosensible, para posteriormente generar señales digitales que llevan información de luminosidad y color. Estos sensores

fotosensibles, comúnmente conocidos como sensores ópticos, presentan una estructura reticular, es decir, están conformados por miles o millones de celdas fotosensibles dispuestas una al lado de otra sobre una superficie plana comúnmente con forma de paralelogramo de ángulos rectos Cada una de estas celdas fotosensibles genera una señal digital que depende de la cantidad de luz que reciben. Dado que la información capturada por el sensor fotosensible es analógica, para que un ordenador pueda interpretarla, la misma debe ser codificada en una señal digital.

2.1 Proceso de la estereoscopia

La disparidad binocular retinal es un proceso en el que intervienen los ojos y el cerebro, dada la posición de los ojos, cada uno recoge imágenes ligeramente distintas. El cerebro une estas imágenes y mediante la interpretación de estas diferencias, calcula la distancia a la que se encuentran los objetos. Esto produce una visión tridimensional con la cual se logra ver exactamente dónde está el entorno con relación al cuerpo.

El hombre ha sido un imitador de la naturaleza desde hace años atrás. En este caso la visión estereoscópica toma como referencia el modelo estereoscópico biológico donde el desplazamiento relativo entre los ojos permite obtener la profundidad de los objetos o tercera dimension, mediante un simple proceso de triangulación a partir de dos imágenes generadas por el mismo objeto de la escena 3D en cada ojo. Esto se debe al hecho de que los ojos están distanciados y hace que las imágenes de los objetos se muestren desplazada según la distancia entre los objetos y los ojos. A fin de explicar de manera clara el proceso de la estereoscopia es preciso establecer un marco teórico que permita contextualizar los aspectos, en los cuales se basa la estereovisión.

La visión estereoscópica es un proceso que se realiza en el cerebro del ser humano para percibir una vista tridimensional de objetos percibidos mediante visión binocular. El cerebro humano interpreta las imágenes que le proporcionan los ojos, las cuales presentan diferencias entre si dada la separación entre los ojos y el resultado de este proceso es la percepción de la profundidad o tercera dimension. El ojo humano funciona de manera análoga a una cámara fotográfica, así por ejemplo, la córnea se comporta como un filtro, el iris es el regulador de la intensidad de la luz, el cristalino actúa como lente y la retina se asimila a la película en la cual se forma la imagen. En el proceso de observación de un objeto, el ojo humano realiza movimientos conocidos como acomodación y convergencia los cuales se producen de manera simultánea para garantizar la comodidad en la observación.

El efecto tridimensional también se puede generar artificialmente. La visión estereoscópica artificial se da cuando se observan dos fotografías de la misma escena, pero tomadas desde puntos diferentes, siendo posible obtener una impresión tridimensional de lo que se observa. Para esto de se deben cumplir dos condiciones: que cada ojo observe la imagen que le corresponde y que las imágenes estén sobre las paralelas a la base estereoscópica, evitando el paralaje vertical. Constituye un procedimiento más para la obtención de la forma de los objetos en la escena. La obtención de la distancia ha sido una preocupación constante en algunos sistemas, particularmente en los diseñados para la navegación robótica, donde el robot necesita conocer a cada momento la estructura de la escena para navegar en el entorno.

2.2 ¿Cómo se construye un sistema básico de visión estereoscópica?

Al igual que ocurre con los sistemas de visión biológica, las máquinas y las computadoras necesitan un mecanismo para generar información profunda sobre su entorno. La obtención de las imágenes de la escena ligeramente desplazadas se puede obtener por alguno de los siguientes procedimientos:

- Alienando dos o más cámaras de forma que se sitúen ligeramente desplazadas en el espacio.
- Desplazando una única cámara con cierta distancia y captando las imágenes en las diferentes posiciones de desplazamiento.

En ambos casos la geometría del sistema puede diseñarse de forma que las cámaras tengan sus ejes ópticos paralelos o convergentes. Gracias a que el ser humano posee uno de los sistemas de visión estereoscópica más desarrollados en la naturaleza, podemos remitirnos a él para verificar varios conceptos.

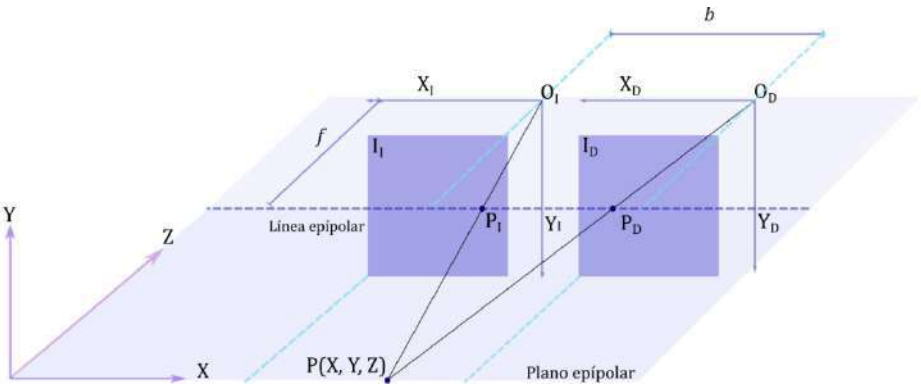


Figura 1. Geometrıa epipolar de la configuracion de un arreglo de vision artificial binocular

En el diagrama de la figura 1, b es la línea base, es decir, es el segmento 3D que une los centros de proyección de ambas cámaras o en otras palabras es la distancia entre las cámaras. La distancia focal, denotada por f, es la distancia del lente al centro óptico/sensor óptico de la cámara (centro óptico izquierdo OI y derecho OD). Ahora, dado un punto P en el espacio tridimensional con. en el espacio tridimensional con coordenadas (X, Y, Z), sus respectivas proyecciones en las imágenes derecha PD e izquierda PI tienen coordenadas xD,yD y xI ,yI , respectivamente.

La geometría epipolar establece las relaciones geométricas que existen entre puntos espaciales en una escena y sus respectivas proyecciones en las imágenes [6].

***Definición 1.1**. [8]Plano epipolares: Plano definido que contiene un punto de la escena 3D, sus respectivas proyecciones en ambas imágenes y los centros de proyección de ambas cámaras (centro del sensor fotosensible). Como consecuencia, los planos epipolares forman un haz de planos cuyo eje es precisamente la línea base. Cualquier punto del espacio tridimensional unido a los dos centros de proyección de las cámaras define este plano.*

***Definición 1.2.** [8] Epipolo: Punto en el que la línea base corta al plano de la imagen asociada. El epipolo es la proyección en una cámara del centro de proyección de la otra cámara. El epipolo puede caer fuera del trozo del plano de la imagen que devuelve la cámara. En particular, cuando la línea base es paralela al plano de la imagen, el epipolo es un punto en el infinito que puede ser representado por un punto del plano proyectivo.*

***Definición 1.3**. [8] Línea epípolar: Es la intersección del plano epípolar con el plano de proyección de una cámara, esta línea une un mismo punto en la imagen izquierda y la imagen derecha. De manera que todos los puntos, cuyas proyecciones izquierdas se encuentren contenidas sobre una misma línea epípolar.*

En la figura 2. Es posible observar el arreglo estereoscópico artificial construido, cuyas bases, como se ha descrito en este trabajo, son: Hardware que consta de dos cámaras con conectividad USB, un ordenador portátil, una tarjeta Arduino y un motor a pasos. Software que es constituido por todas las paqueterías de ROS descargadas de GitHub, los códigos fuente de programación para el control del motor a pasos y para el procesamiento de imágenes. La captura o adquisición de imágenes por parte de arreglo binocular se debe realizar de forma simultánea, es decir, las imágenes capturadas, además de ser de la misma escena, deben pertenecer a un mismo instante.

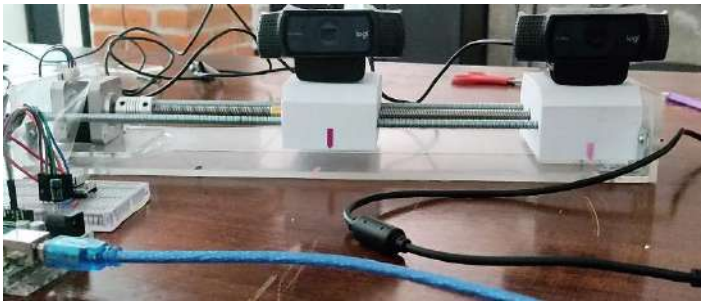


Figura 2. Dos cámaras ubicadas, cuyos ejes ópticos sean paralelos entre si sobre un eje situado en el plano horizontal.

2.3 Calibración de imágenes

No obstante, algunas imágenes tienen errores introducidos por fallos en el sistema de adquisición. Estos fallos entran en dos categorías. En primer lugar, se puede haber errores debido a los defectos físicos de la captura de imágenes, tales errores producen una apariencia distorsionada de la imagen y cualquier medida directa de las posiciones o longitudes producirá un error.

Para poder deducir la posición tridimensional de un objeto, es necesario conocer antes algunas características muy importantes, estas son la geometría del arreglo binocular y los parámetros intrínsecos y extrínsecos de cada cámara [5].
Las distorsiones en las imágenes se resuelven utilizando técnicas de corrección geométrica. Dichas distorsiones generalmente afectan a las relaciones espaciales entre los pixeles de las imágenes. Las transformaciones geométricas suelen aplicarse para reponer pixeles en sus lugares ideales en la imagen.

En pocas palabras, el proceso de calibración consiste en:

1) Determinar los parámetros propios de las cámaras, tales como la longitud focal, la cuadratura de los pixeles, el centro de la imagen y la distorsión radial. La idea principal de identificar estos parámetros es corregir posibles distorsiones de la imagen [7].

2) Determinar la relación de posición relativa entre las dos cámaras. Esta relación está representada por una matriz de rotación y una matriz de traslación para cada cámara. Las cámaras, están referidas a un mismo sistema de coordenadas, por lo tanto, determinar la posición y orientación de una con respecto a la otra es relativamente sencillo.

El proceso de calibración de imágenes trata de determinar los parámetros intrínsecos de las cámaras, tales como la distancia focal, el centro del plano sensor y la distorsión de la lente para poder luego determinar la geometría de los objetos observados por la cámara. Las técnicas de calibración se pueden clasificar, según el tipo de patrón. Conocido como patrón planar, que es el tablero de ajedrez. El tamaño del tablero se refiere al número de esquinas internas como se describe en la documentación de Open Cv. Para la calibración se utiliza una imagen de cuadros, cuyas esquinas se utilizan como puntos de calibración.

El tablero debe sostenerse horizontalmente y para obtener una buena calibración se debe mover en el marco de la cámara de modo que la detección del tablero se de en:

- Calibración en X: el tablero se detecta en los bordes izquierdo y derecho.
- Calibración en Y : el tablero se detecta en los borde superior e inferior.
- Skew: el tablero se detecta en varios ángulos con respecto a la cámara.
- Calibración de tamaño: el tablero de ajedrez llena todo el campo de visión.

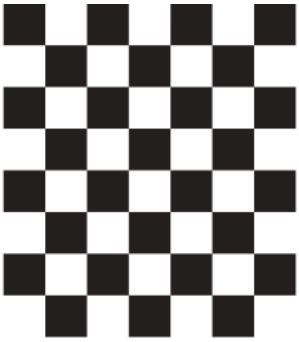


Figura 3. Imagen a cuadros para la calibración de las cámaras

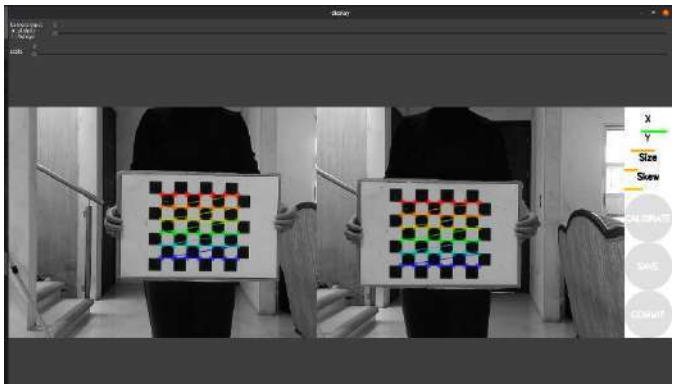


Figura 4. La calibración inicia hasta que haya un tablero de ajedrez en la escena

En la ventana las barras indicadoras de la calibración aumentaran de longitud a medida que el tablero de ajedrez se mueve. Una vez que se han obtenido suficientes datos de calibración, se enciente el botón CALIBRAR en la ventana, para que el nodo calcule los parámetros de calibración de la cámara. Debe hacer clic en COMMINT una vez que se obtengan resultados satisfactorios, para guardar estos parámetros permanentemente; el nodo carga estos nuevos parámetros de calibración de la cámara mediante una llamada de servicio.

Los parámetros identificados por el proceso de calibración son almacenados principalmente en tres matrices: la matriz de rotación, la matriz de traslación y la matriz fundamental (una para cada cámara). Las matrices de traslación y rotación simplemente describen las traslaciones y rotaciones en el espacio euclídeo tridimensional de una cámara con respecto a la otra. Por otro lado, la matriz fundamental almacena una serie de parámetros tales como la distancia focal y los coeficientes de distorsión. En otras palabras, las matrices de rotación y translación contienen los parámetros extrínsecos del arreglo binocular mientras que la matriz fundamental contiene los intrínsecos

Una vez finalizado el proceso de captura y procesamiento de diferentes posiciones, se obtiene una matriz de la cámara, con los coeficientes de distorsión; los valores de rotación y traslación de la cámara, adicionalmente los valores intrínsecos y extrínsecos de ambas cámaras. Existen diferentes algoritmos de correspondencia, no obstante, dado que una imagen es un arreglo bidimensional, una práctica inteligente consiste en limitar la búsqueda de pixeles correspondientes a una sola dimension, es decir, es conveniente hallar imágenes alineadas horizontalmente tal que la búsqueda de pixeles correspondientes se restrinja a la misma línea horizontal. Alinear la imágenes horizontalmente se conoce como rectificación de imágenes.

Aquí, se genera un mapa de disparidad que se forma con la diferencia entre las dos imágenes de las dos cámaras, dada la separación que existe entre ellas definidas por la técnica de visión

estereoscópica. Una vez conocidos los parámetros de las cámaras, se puede hallar las distancias mediante una triangulación que permite generar un mapa de disparidad. A este proceso de denomina proyección.

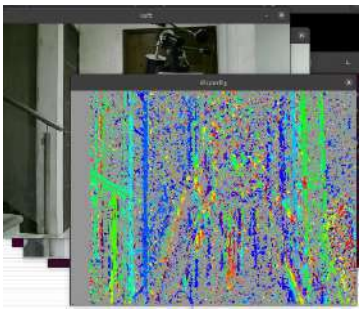


Figura 5. El mapa de disparidad generado por la diferencia de ubicación del mismo punto observado en las dos cámaras.

Resulta difícil analíticamente evaluar la precisión de la calibración ya que todas las medidas tomadas por el sistema se visión dependen de los resultados de la calibración. Una de las formas en las que se puede valorar, es de acuerdo con el error en la localización de puntos conocidos en el mundo 3D, una vez se han calibrado ambas cámaras y utilizando la triangulación estereoscópica se miden las posiciones de puntos en la escena 3D. Dichas posiciones que son conocidas con cierta precisión

2.4 Correspondencia

Hasta ahora no se ha descrito a detalle el proceso para determinar la profundidad de un punto en el espacio a partir de un par de imágenes, no obstante, a grandes rasgos podemos decir que dicho proceso parte de la identificación de la proyección de dicho punto 3D sobre cada una de las imágenes. En otras palabras, consiste en identificar el par de píxeles que corresponden al mismo punto en el espacio.

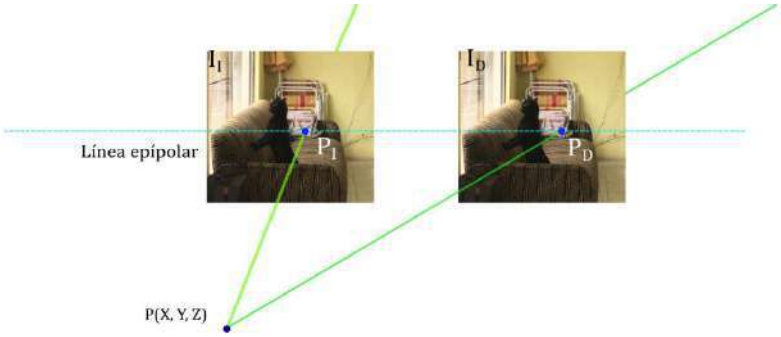


Figura 6. El proceso de correspondencia.

Dado un punto P cualquiera de la escena 3D, llega a determinar cuál es su proyección en las imágenes del par estéreo. La correspondencia constituye en principal problema dentro del proceso de la visión estereoscópica.

Los algoritmos de correspondencia se basan en dos tipos de técnicas:

- Técnicas basadas en área: Estas consideran un entorno o vecindad alrededor de un pixel en particular en una de las imágenes. Posteriormente, se analiza la imagen restante en busca de una región similar. Dado que el proceso anterior se repite para un número considerable de pixeles, es necesario hacer que el sistema de visión este sujeto a diferentes restricciones geométricas, tales como la que proporciona el proceso de rectificación.

- Técnicas basadas en características: En estas técnicas, la identificación de los pixeles se realiza tomando en cuenta determinadas características presentes en ambas imágenes. La idea es superponer ambas imágenes tomando en cuenta dichas características. Se entiende por característica a una estructura significativa en la imagen, tales como bordes, puntos de borde, segmentos de borde o regiones. Normalmente, la forma de identificar características consiste en analizar conjuntos de píxeles con atributos similares. Estos atributos pueden ser simples, como el color de lo píxeles o la intensidad de brillo.

Si bien las técnicas basadas en características pueden prescindir del proceso de rectificación, en la actualidad, las aplicaciones y los trabajos basados en técnicas de área predominan sobre las de características. Por un lado, debido a que en muchas ocasiones las imágenes carecen de suficientes características bien definidas, resultando en correspondencias pobres. Por otro, las tareas de procesamiento que requieren las primeras son más fáciles de implementar, lo cual se traduce en un menor costo computacional, posibilitando así su implementación en tiempo real.

2.5 Cálculo de la distancia

El método para determinar la distancia a la que se encuentra un objeto a partir de dos o más imágenes digitales se basa en la geometría del arreglo.

Un sistema de visión binocular típico se caracteriza por un par de cámaras con ejes ópticos paralelos entre sí y separados horizontalmente por una distancia llamada línea de base, generalmente indicada por la letra b. El eje óptico de una cámara es una línea imaginaria que define el camino que recorre la luz a través de la cámara. H. Esta es la línea que conecta el centro de curvatura de cada lente de la cámara y el centro del sensor fotosensible, conocido como centro de proyección. El eje óptico de la cámara es perpendicular a la línea de base y su línea de exploración o línea epipolar es paralela a la línea de base. Las líneas epipolares conectan proyecciones en cada imagen del mismo punto 3D.

Como se mencionó anteriormente, un conjunto de binoculares suele construirse de manera que los ejes ópticos de las cámaras que lo componen sean paralelos entre sí y perpendiculares a la línea de base. Estas imágenes capturadas presentan diferencias dada la separación de las cámaras.

Debido a la restricción epipolar, el cálculo de la distancia se resume en una triangulación, es decir, en un análisis de triángulos semejantes considerando la geometría epipolar del arreglo binocular.

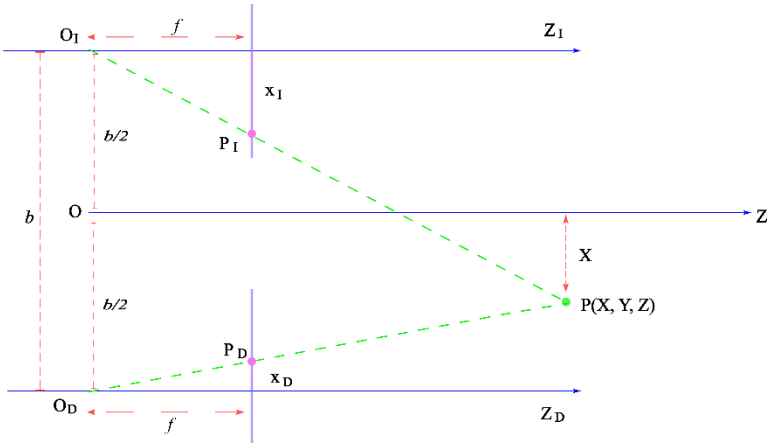


Figura 7. Geometría de dos cámaras con ejes ópticos paralelos desde una perspectiva superior.

En el diagrama de la Figura 7, b es la línea base, es decir, es el segmento 3D que une los centros de proyección de ambas cámaras o en otras palabras es la distancia entre las cámaras. La distancia focal, denotada por f, es la distancia del lente al centro óptico/sensor óptico de la cámara (centro óptico

izquierdo OI y derecho OD). Ahora, dado un punto P en el espacio tridimensional con coordenadas (X, Y, Z), sus respectivas proyecciones en las imágenes derecha PD e izquierda PI tienen coordenadas xD,yD y xI ,yI , respectivamente. Del diagrama de la Figura 7., por triángulos semejantes tenemos que (1)

$$Z = \frac{f}{d} b \qquad (1)$$

La expresión (1) muestra que la profundidad Z es inversamente proporcional a la disparidad d, la cual es el desplazamiento horizontal del punto P proyectado

2.6 Construcción del sistema mecánico de desplazamiento

Se propuso montar un par de cámaras USB sobre una base que permite modificar la separación entre las cámaras (línea base) con la ayuda de un motor. Distintos componentes de la base fueron llevados a impresión 3D para asegurar la mejor calidad posible de las piezas. Por tal motivo, fue necesario realizar un dibujo CAD (Figura \ref.{dibujoCadBase}). Adicional a las impresiones 3d, la base consiste en un par de varillas guía y un tornillo sin fin que permite el desplazamiento de una de las cámaras, es decir, permite transformar el movimiento circular del motor en un movimiento lineal

Para equipar el arreglo binocular, se planteó montar un par de cámaras USB sobre una base de fabricación propia y la cual permite modificar la separación entre las cámaras (línea base) con la ayuda de un motor a pasos. Los distintos elementos de la base han sido impresos en 3D para garantizar la mayor calidad posible de las piezas. De tal manera que se realizó un dibujo. Por otro lado, la base contiene un par de varillas guía y un tornillo sin fin que proporciona el desplazamiento de una de las cámaras, es decir, convirtiendo así el movimiento angular del motor en uno lineal.

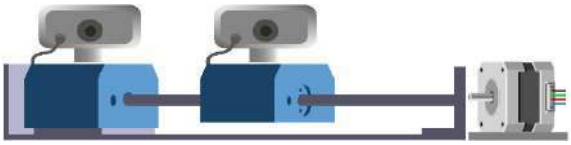


Figura 8. Dibujo asistido por computadora de la base propuesta para soportar las cámaras USB.

El motor paso a paso utilizado fue un motor de tipo bipolar, cuyas iniciales del nombre hacen referencia al estándar, NEMA 17KS42STH34- 15044, que consta de dos fases y dos bobinas conectadas a cuatro cables cuyas dimensiones se muestran en la Figura: Este motor requiere de una alimentación de 12 V de corriente directa (DC) y su ángulo de paso indica cuántos grados se mueve el eje del rotor en cada paso.

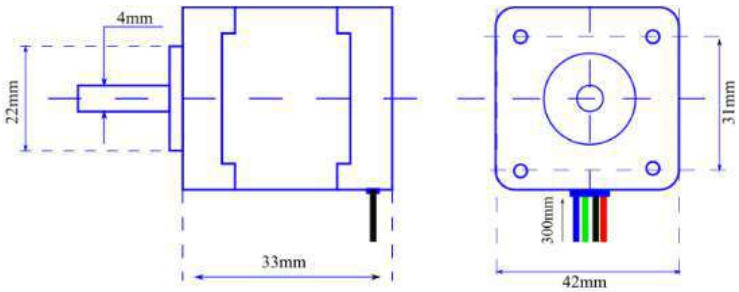


Figura 9. Dimensiones del motor NEMA 17

El motor a pasos utilizado fue uno de tipo bipolar NEMA 17KS42STH34- 15044 (las siglas del nombre hacen referencia al estándar industrial, utilizado para establecer normas mecánicas) que consta de dos fases, dos boninas expuestas por 4 cables y cuyas dimensiones son mostradas en la Figura.

Este motor necesita una alimentación de 12 V de corriente directa (DC) y su ángulo de paso indica cuantos grados se mueve el eje del rotor en cada paso. Para el manejo de este servomotor es necesario que la electrónica lo controle a base de señales PWM (Pulse Width Modulation), teniendo en cuenta que para la comunicación entre la electrónica y el dispositivo es necesario un enlace del tipo serial.

Como no es posible controlar el motor directamente desde la placa Arduino, se requiere un controlador. El controlador seleccionado es DRIVER A4988, que tiene varias funciones de seguridad integradas, como protección contra sobre corriente, cortocircuito, bloqueo por bajo voltaje y sobre temperatura.

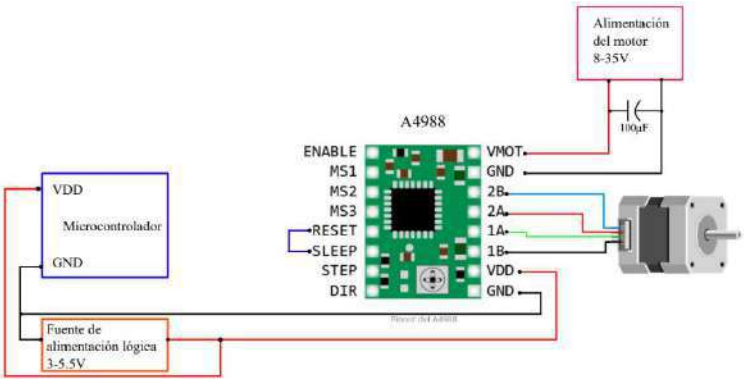


Figura 10. Diagrama del circuito encargado de controlar el motor a pasos.

Al tener como base un servomotor, el sistema mecánico obliga a que la electrónica genere señales PWM (Pulse Width Modulation) para su manejo y teniendo en cuenta la comunicación con el computador, es necesario un enlace de tipo serial entre la electrónica y el dispositivo.

2.7 Ros y Ubuntu

El Sistema Operativo Robótico o ROS (Robot Operating System) es un framework o marco de trabajo de desarrollo de software, es decir, proporciona un conjunto de librerías (herramientas de programación previamente desarrolladas) que permiten reciclar y desarrollar código para implementar nuevas aplicaciones en el ordenador.

ROS provee los servicios estándar de un sistema operativo tales como abstracción del hardware, control de dispositivos de bajo nivel, implementación de funcionalidad de uso común, paso de mensajes entre procesos y mantenimiento de paquetes. Estas características permiten desarrollar, modificar y ejecutar códigos de programación a través y mediante uno o varios dispositivos con gran facilidad [9] ROS se basa en una arquitectura distribuida de procesos, es decir, permite a˜nadir nuevos servicios (funcionalidades) que pueden compartir los recursos disponibles con aquellos servicios ya existentes y sin perjudicarse entre sí. En, estos servicios son generados en los llamados nodos. Un nodo es un archivo ejecutable que esta diseñado para controlar un elemento del hardware o desempeñar un proceso de cómputo. Todo nodo se ubica dentro de un paquete o paquetería ROS. Una paquetería es un conjunto de funcionalidades desarrolladas para desempeñar una tarea especifica. Dentro de ROS, los nodos pueden comunicarse con otros nodos a través de mensajes que transitan en canales de comunicación llamados tópicos. Las librerías y la arquitectura de ROS hacen posible trabajar con archivos ejecutables en distintos lenguajes de programación (e.g.: Python, C/C++, R, Java, etc.).

ROS es un software de libre acceso que puede ser utilizado tanto para aplicaciones comerciales como para fines de investigación. Mas importante aún es la importante comunidad alrededor de ROS, la cual continuamente contribuye con nuevas paquetería y aplicaciones que pueden ser fácilmente integradas e incluso modificadas pare desempeñar tareas personalizadas. Estas contribuciones suelen ser compartidas en plataformas en línea, principalmente en repositorios de GitHub, de donde pueden ser fácilmente descargadas.

2.8 Segmentación de color

La segmentación es una tarea de gran relevancia para una gran cantidad de sistemas de análisis de imágenes dada la importancia de sus resultados. La segmentación de una imagen puede considerarse como la partición de esta en un conjunto de regiones de acuerdo con una serie de criterios. De manera general, durante el análisis de una región de la imagen se debe considerar un conjunto de descriptores basados en la intensidad y en las propiedades espaciales. Por ejemplo, la proximidad geométrica juega un papel vital en la segmentación. Los píxeles que se encuentran en una misma vecindad tienden a tener propiedades estadísticas muy similares y por lo tanto, es más probable que pertenezcan a una misma región. Los algoritmos de segmentación de imágenes deben tomar en consideración tanto la homogeneidad de los valores de intensidades como la proximidad que exista entre los píxeles para producir imágenes con regiones conectadas.

La segmentación previa de las imágenes estereoscópicas. Estas técnicas dividen una o ambas imágenes estéreo en regiones de color que no se superponen. En lugar de calcular la disparidad por cada píxel, estás técnicas asignan un valor de disparidad único a cada región resultante. La detección depende de que las señales de tráfico sean de colores brillantes, como el azul o el rojo, que son fáciles de distinguir. De esta forma se pueden descartar los píxeles restantes de la imagen y localizar de forma rápida y sencilla los objetos que deseamos conocer.

2.9 Haarcascades

La detección de objetos utilizando haarcascades es un método efectivo basado en el aprendizaje automático donde una función en cascada se entrena a partir de muchas imágenes positivas y negativas, es decir, el ordenador recibe información de imágenes previamente clasificadas. Este proceso de “aprendizaje” permite al ordenador analizar imágenes no vistas con anterioridad y poder detectar en ellas objetos similares a los vistos anteriormente. Se dice que se emplea una función en cascada dado que la misma está compuesta por una serie de clasificadores cuya función es analizar progresivamente la imagen. A su vez, estos clasificadores están basados en características conocidas como Haar [11].

2.10 Red neuronal

Los últimos años han visto avances en cuanto a las variantes de algoritmos para la detección de objetos con diferentes características, Aunque uno que destaca actualmente debido a su importante diferencia de velocidad. La diferencia, es que este no implica múltiples capas de clasificación y predicción de varios bucles por región.

El algoritmo YOLO consiste en una red neuronal convolucional para la detección rápida y precisa de objetos creada por Joseph Redmond como principal autor [10], que predice los objetos presentes en la imagen y sus cuadros delimitadores de una sola pasada. A diferencia de las propuestas basadas en regiones donde necesitamos extraer características y clasificarlas con diferentes redes, YOLO realiza tanto la extracción de características como la clasificación de objetos y la predicción del cuadro delimitador utilizando una sola red. Para hacer las predicciones, a diferencia de los métodos anteriores, este sistema consume la imagen completa, en lugar de regiones de esta. Esto hace que se limiten los errores a la hora de reconocer las clases de objetos que hay en la imagen.

En Open CV, el nodo DNN detect, Deep Neural Network, es una biblioteca de código abierto de visión por computadora y aprendizaje automático, Creada en C++, pero puede encontrar fácilmente contenedores en Python, Java o C++ los cuales pueden ser traducidos por la paquetería rospy, entre los diferentes lenguajes en ROS para encontrar objetos en un flujo de imágenes y proporcionar sus cuadros delimitadores. El hecho de que sea una arquitectura muy rápida, la hace idónea para que se use en la detección en video en tiempo Para utilizar el módulo DNN, primero se deben descargar los archivos repositorio de Open CV.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 26, pp. 335 – 349
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

3. RESULTADOS

Se realizaron diferentes pruebas, con respecto al objeto que el sistema era capaz de identificar, como lo son, personas, sillas; animales como, perros y gatos. Con respecto al cálculo de la distancia, se realizaron mediciones escalonadas de 50cm.

3.1 Segmentación de color

Esta sección presenta los resultados obtenidos al probar el algoritmo de segmentación de pares estéreo y compararlos en función de sus características. En cada uno de estos ejemplos se muestra el par estéreo utilizado, la segmentación de la imagen de referencia, as´ı como el centroide de cada región y finalmente el resultado de la coincidencia. Finalmente, en base a la segmentación inicial y la profundidad computacional se detectarán los objetos deseados (Figura 11).

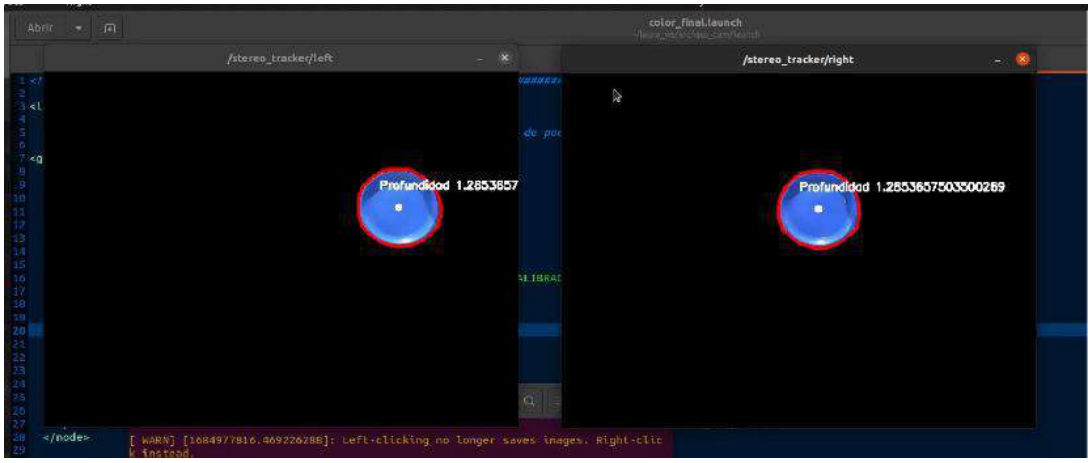


Figura 11. visualización de imágenes capturadas por las cámaras USB haciendo uso del algoritmo basado en segmentación de color.

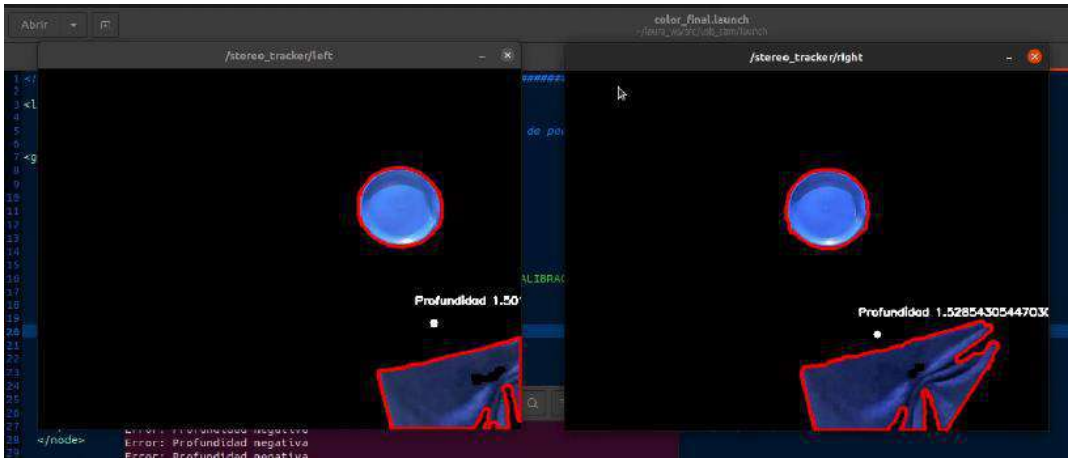


Figura 12. Regiones que se superponen y generan error en el cálculo de la distancia.

Pero tenemos el inconveniente de que también se localizan otras regiones que cumplen estas condiciones incluyendo el ruido.

3.2 HAARCASCADES

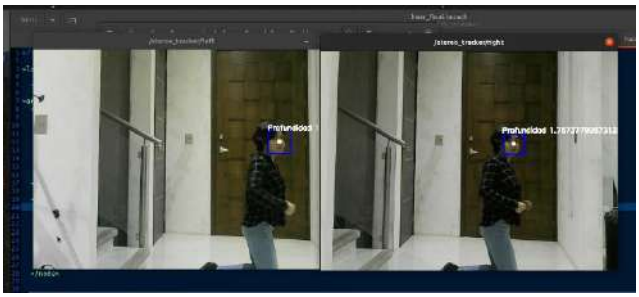


Figura 13. Estimaciones de distancia haciendo uso de Haarcascades

Por otro lado, como se mencionó, Haarcascades considera subregiones de distinto tamaño. Esto se hace para incrementar la precisión del algoritmo. Así, si bien un tamaño inicial pequeño permite minimizar el error del algoritmo e incrementar su sensibilidad, también incrementa su coste computacional

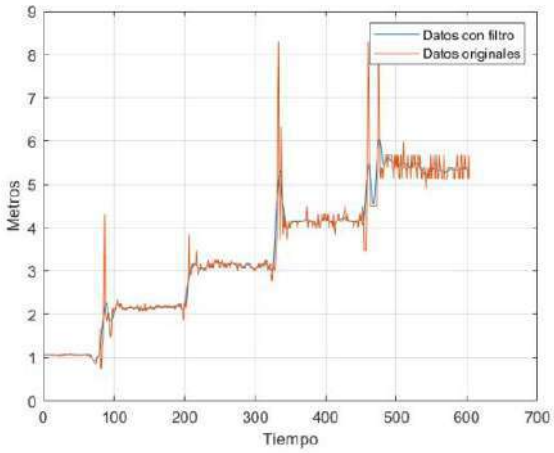


Figura 14. Estimaciones de distancia haciendo uso de Haarcascades

La desventaja de usar haarcascades es que tienden a detectar falsos positivos y dado que es necesario entrenar una función de cascada para una clase particular de objetos, la diversidad de objetos que pueden detectar estos algoritmos es muy poca. Sin embargo siguen siendo una parte importante en el tratamiento de imágenes y visión artificial dado su relativo bajo costo computacional. Por tal motivo es una técnica que es ampliamente utilizada.

3.3 RED NEURONAL

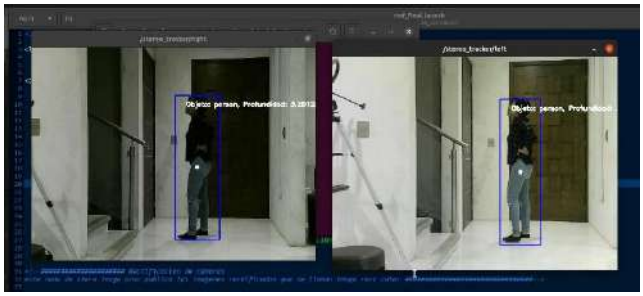


Figura 15. Visualización de imágenes capturadas por las cámaras USB haciendo uso de una red neuronal.

Por ejemplo en la figura 15. Se pueden visualizar las imágenes de la cámara izquierda y derecha respectivamente, en ambas el algoritmo identifica a una persona que se encuentra estática a 3.2012m de distancia de la ubicación de las cámaras.

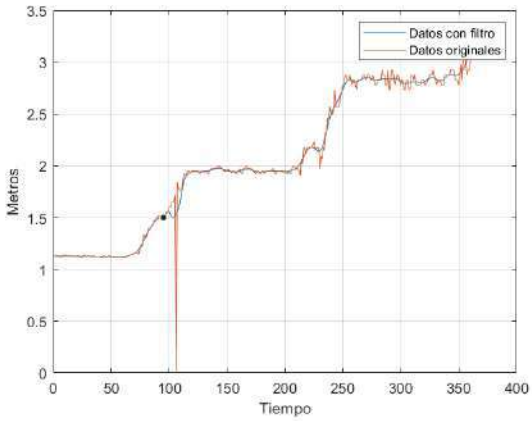


Figura 16. Estimaciones de distancias del algoritmo con red neuronal.

Los algoritmos de detección de objetos que fundamentan este trabajo presentan dificultades por superar como, la tasa de error en la estimación de la distancia reflejados principalmente en la Figura 16. La muestra empleada para esta investigación consta de intervalos de 50cm de distancia, considerando una distancia máxima de 3.5 metros de alcance del algoritmo. El cual, se ve limitado por diferentes condiciones, como se mencionó anteriormente la visión estereoscópica es solo una de las herramientas de observación del sistema de visión del ser humano, por lo que las limitaciones de esta suelen relacionarse con la iluminación, la calidad de la calibración y la capacidad de procesamiento del ordenador en el que se trabajó.

4. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se han expuesto las diferentes aplicaciones de la visión artificial, así como algunos de los fundamentos teóricos de este campo científico, y la implementación de una red neuronal convolucional con el fin de identificar condiciones para su implementación en diferentes entornos.

Debido a limitaciones prácticas, este documento no puede proporcionar una revisión exhaustiva de la iluminación, los obstáculos, las oclusiones y demás estudios que podrían generar errores en la estimación de la distancia, así como también en la detección de objetos en la escena. El objetivo de este estudio es familiarizar al investigador con algunas de las diferentes técnicas de visión artificial que se están implementando para impulsar o desarrollar la navegación de los sistemas robóticos, aunque también se ha centrado en la evaluación del mismo desde el punto de vista de su efectividad en términos de rendimiento y en tiempos de cómputo. Dados los resultados es posible considerar que se ejecuta en un tiempo reducido, sin embargo este perfila como una posible solución para su traslado a sistemas reales.

Cabe destacar que lo interesante de estos datos es la relación del beneficio el entrenamiento e implementación de redes neuronales convolucionales con las técnicas de visión artificial, que si bien no son recientes como se mencionó anteriormente, están referenciados al sistema de visión del ser humano que se considera, es de los m\'as evolucionados en la naturaleza. A pesar de que sería interesante examinar en más detalle la implementación de la técnica de visión artificial estereoscópica con otras técnicas de visión artificial, este trabajo se limitó al reconocimiento de estas técnicas, se ha propuesto considerar dicho estudio para trabajos posteriores.

Referencias

[1] K Schwab. The fourth industrial revolution: what it means, how to respond. https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrialrevolutionwhat-it-means-and-how-to-respond/, 2016.

[2] Assunta Di Vaio, Rosa Palladino, Rohail Hassan, and Octavio Escobar. Artificial intelligence and business models in the sustainable development goals perspective: A systematic literature review. Journal of Business Research, 121:283–314, 2020.

[3] Anthony Elliott. The culture of AI: Everyday life and the digital revolution. Routledge, 2019.

[4] Elsa Adriana Cárdenas Quiroga, Luz Yolanda Morales Martin, and Andrés Ussa Caycedo. La estereoscopia, métodos y aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento. Revista Científica General José María Córdova, 13(16):201–219, 2015.

[5] Pajares Martin Sanz Gonzalo y De la Cruz García Jesús M. Visión por computador: imágenes digitales y aplicaciones. Alfa Omega Grupo Editor, S.A. de C.V, 2002.

[6] Diego Alfonso Yhama Valero. La imagen flotante: “principios sobre estereoscopia”

[7] Pablo Vera and Joaquín Salas. determinación de la incertidumbre de los parámetros intrínsecos del modelo de una Cámara.

[8] Santiago Martin, Javier Suárez, Ramon Rubio, and Ramon Gallego. aplicación de los sistemas de visión estereoscópica en las enseñanzas técnicas. Escuela de Ingenieros técnicos Industriales de Gijon. Universidad de Oviedo, 2004

[9] Sandford’s Artificial Intelligence Laboratory Willow Garage. Robot operating system. https://www.ros.org/. Accessed: 2023-07-20.

[10] Ross Girshick Ali Harhali Joseph Redmon, Santosh Divvala. “you only look once: Unified, real-time object detection.”. https://arxiv.org/abs/1506.02640. Accessed: 28-09-25.

[11] Intel Corporation. Cascade classifier. https://docs.opencv.org/3.4. Accessed: 2023-04-25.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 27, pp. 350 – 363
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Dispositivo para diagnóstico de fallas en el sistema eléctrico de remolques vía bluetooth “CheckLight”

Durán Lugo Juan Miguel, Rodríguez Pérez Manuel Jesús, Uc Ríos Carlos Eduardo, Canto Canul Roberto Carlos, Lozano Casanova María Beatriz y Herrera Rodríguez Cristian Jassiel

Universidad Autónoma de Campeche – Facultad de Ingeniería
jumduran@uacam.mx

Resumen

Percances y accidentes que involucran los denominados “Vehículos de tarea pesada” suelen estar presentes con mayor frecuencia en los últimos años; ya sea en carreteras Estatales o Nacionales, en grandes espacios para aparcar o hasta incluso dentro de la misma ciudad. Muchas de estas contingencias están severamente involucradas con fallos eléctricos relacionados directamente con el funcionamiento del sistema eléctrico de las luces de los remolques de tractocamiones. El sistema eléctrico que alimenta específicamente las luces de un remolque tiene gran relevancia en el tránsito vehicular, ya que puede indicar desde grandes distancias si un vehículo está reduciendo su velocidad, si se encuentra por girar o realizar alguna maniobra e incluso si se encuentra estacionado en su totalidad, pero es cuando se transita de noche o cuando en el camino se encuentra reducido el campo de visión del conductor que las luces tienen un papel importante, sin pasar por alto las faltas a la ley que se pueden generar si un oficial de tránsito observa la falta de las mismas, generando multas e incluso el levantamiento del vehículo ante la ley, lo que ocasiona pérdidas en empresas de autotransportes de entre $1,000,000 y $2,000,000 de pesos mexicanos anuales, son principalmente estas razones por las cuales se deben realizar continuamente revisiones y pruebas al sistema de luces. Por medio del prototipo denominado “CheckLight” se implementa un dispositivo físico controlado inalámbricamente mediante Bluetooth, que se encarga de verificar la totalidad del esquema eléctrico de luces para un remolque tipo caja seca, caja refrigerada, cama baja y plataforma plana, o cualquier otro tipo de remolque que cuente con el protocolo SAE J560 en un tracto camión y de esta manera cerciorarse del correcto funcionamiento de las luces de freno, direccionales (derecha e izquierda) y luces tipo cuartas (derecha e izquierda).

Palabras clave: Protocolo SAE J560, Sistema eléctrico de remolques, Desarrollo de app.

1. Introducción

Las carreteras son el medio de circulación más utilizado en el mundo, y específicamente las carreteras federales en México están transitadas en su mayoría por vehículos pesados que transportan productos variados, siendo estos los remolques los más usados, de los cuáles existen varios tipos para los diferentes cargamentos. Estos vehículos circulan tanto de día, así como de noche, en el caso este último, se sabe que tiene un mayor índice de peligro puesto que la oscuridad provoca graves accidentes, debido a esto mismo de presentarse alguna falla en el sistema eléctrico que controla las luces resultar en accidentes potencialmente catastróficos. Al realizar un acercamiento al sector que regula la transportación de grandes cantidades de productos, en específico los remolques, es fácil identificar las diferentes problemáticas que surgen en la planificación de estrategias para trasladar dichos cargamentos de manera segura. Solo en México, de 2022 al 2023, los accidentes de gravedad en los que participaron transportes pesados de carga se incrementaron en 359 por ciento, de acuerdo con un

reporte dado a conocer por la Subsecretaría de Control de Tránsito de la SSP. De igual manera, del total de accidentes automovilísticos los camiones pesados están implicados en el 17% del total de accidentes fatales en los que generalmente se identifican defectos eléctricos principalmente asociados a las vías de luces [1].

El sistema eléctrico contiene una interfaz bajo el protocolo SAE J560, que integra un estándar de colores y ubicaciones para un conector de siete vías instalados en remolques, siendo los remolques de tractocamiones el principal objetivo de uso, sin embargo, igualmente se conocen remolques para aplicaciones agrícolas que utilizan este mismo protocolo. Para verificar el correcto funcionamiento del sistema eléctrico de los remolques que alimentan las luces es necesario tener un tractocamión de tipo quinta rueda, ya que este tiene un arnés tipo macho dedicado a las luces, sin embargo, en caso de que no tenga acceso al vehículo pesado, resulta difícil alimentar este conector para poder revisar el estado de las luces. La relación que se halla en esta problemática, deriva en el uso de un microcontrolador para hacer la gestión de control de la electrónica de potencia y de esta manera alimentar este mismo y cumplir con la tarea de revisión, ya que la falla de una luz puede encaminar a dos grandes problemas, el primero y más riesgoso son los accidentes en carretera, el segundo, pero no menos importante son faltas a la ley que terminan en multas para el dueño del remolque. Finalmente, al definir la problemática del proyecto, se encontró que al momento de realizar la revisión del sistema eléctrico, la longitud del remolque presenta una seria dificultad, en promedio las distancias oscilan entre los 12 y 16 metros de largo, siendo esta un área de oportunidad para un desarrollo tecnológico con una aplicación móvil y usando el protocolo de comunicación Bluetooth reducir los tiempos del operador en desplazarse del vehículo a seleccionar la luz que se desea probar y regresar a verificar de forma visual su funcionamiento [2].

Tomando como base lo anterior y proyectando la aplicación de sistemas ingenieriles del Área de la Mecatrónica, se integraron diferentes tecnologías y desarrolló una aplicación móvil, la cual se denominó “CheckLight”, usándose para verificar el sistema eléctrico de los remolques, bajo el protocolo SAE J560, empleando un microcontrolador para gestionar la parte de toma de decisiones, electrónica de potencia para el acoplamiento y finalmente comunicación inalámbrica vía Bluetooth para la gestión de información con la aplicación móvil.

2. METODOLOGÍA

2.1 Estándar SAE J560

El estándar SAE J560 para conectores de remolques se emitió originalmente en 1951 para crear un estándar en la industria de vehículos comerciales para el cableado eléctrico entre camiones pesados y remolques. Dicho protocolo describe las conexiones eléctricas entre un camión y un remolque (vehículos pesados). Incluye conectores primarios para iluminación y conectores auxiliares para funciones adicionales. Esta norma SAE proporciona los requisitos mínimos para el receptáculo y el enchufe del cable de puente principal y auxiliar para los sistemas de cable de puente de camión a remolque y plataforma rodante convertidora para aplicaciones nominales de 12 VCC, incluyendo los procedimientos de prueba, el diseño y los requisitos de rendimiento [3].

Su propósito es transferir las señales de iluminación según lo determina la FMVSS (Normas Federales de Seguridad de Vehículos Motorizados), desde la cabina del conductor al remolque y proporcionar al remolque energía primaria ABS (Sistema Antibloqueo de Ruedas) continua, incorporando enchufes, tomas y cables [3]. Los sistemas de iluminación y sus arneses deben ser diseñados para una diferencia de potencial de 12 volts, siendo que el sistema de iluminación cuando opera con un voltaje de 12,5 a 13,5 volts, medidos en el conector del chicote eléctrico del tractocamión, no debe tener una caída mayor a 0.7 volts por remolque, medidos en las lámparas traseras requiriéndose de este modo un mínimo de 10 volts en cualquier lámpara de cualquier combinación de vehículos [4].

Este estándar establece colores para los 7 cables de la siguiente manera: Blanco (WHT) como tierra, negro (BLK) como cuartos o luces de galibo, amarillo (YEL) direccional izquierda, rojo (RED) luz de freno, verde (GRN) direccional derecha, café (BRN) cuartos o luces de identificación, azul (BLU), alimentación directa o ABS (ver Figura 1). El cableado debe ser instalado de tal forma que se accesible para el mantenimiento desde afuera del remolque, los cables y los arneses deben estar protegidos de la abrasión, grasas, aceites, combustibles, rozamientos y actividades de carga, manteniendo aislados todos los filos de partes metálicas que pudieran estar en contacto con cables o arneses. Si un arnés llegara a perforar una parte metálica se recomienda colocar un ojal entre el cable y la parte metálica o recubrir el arnés con un tubo protector. Los cables deben ser sujetados y evitar que estén sueltos en claros superiores a 12 pulgadas. El arnés principal debe ser de una pieza desde el conector de 7 vías frontal hasta el arnés de las calaveras, pudiendo tener derivaciones para las direccionales centrales, las luces frontales superiores deberán conectarse directamente al conector de 7 vías, finalmente las conexiones deberán cumplir con los requerimientos de resistencia a la corrosión [5] establecidos en la norma SAE-J575 4.4, así como utilizar grasa dieléctrica que prevenga la corrosión.

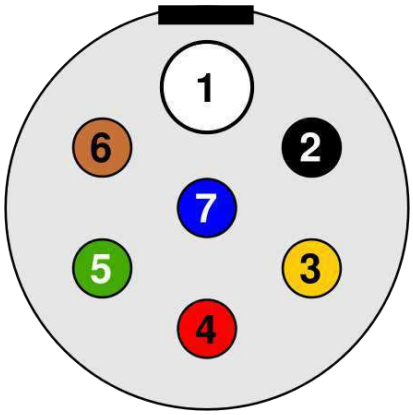


Figura 1. Conector Estándar SAE J560. ***https://encyclopedia.pub/entry/33291, 2022.***

En lo que respecta a la caída de voltaje, este es el factor primordial para la selección del calibre adecuado del cable, siendo la longitud de cable en el circuito el factor que contribuye de mayor manera para la caída de voltaje. Estos arneses se deben cumplir con las especificaciones tales como cable de cobre de alta calidad en los siguientes calibres: Blanco en calibre 8, Rojo y Azul en calibre 10, Amarillo, Verde, Café y Negro en calibre 12. El uso de estos arneses le asegurará que las líneas eléctricas no se sobrecalienten y que la intensidad luminosa de las luces del último remolque sea adecuada [6].

2.2 Diseño de aplicación móvil para sistema operativo Android

Se diseñó una aplicación bajo el sistema operativo Android mediante la página MIT App Inventor, integra un entorno de desarrollo amigable para la creación de aplicaciones, en primera instancia el diseño de la interfaz gráfica de usuario resulta intuitivo y para la programación se usa un estilo de programación gráfica a bloques, ideal para desarrollar las habilidades de programación de cualquier persona [7].

Teniendo como principales requerimientos que la aplicación sea intuitiva y fácil de usar, en primera instancia se ubicó en el diseño un recuadro para conectar el dispositivo Bluetooth con el dispositivo móvil, a continuación se colocaron los recuadros para encender (con el botón verde ON) y apagar (con el botón rojo OFF) las luces que se requieran probar, estos respectivamente son los botones para la direccional izquierda, direccional derecha, intermitentes, frenos, cuartos izquierdo, cuartos derecho y encender todas las luces. Se crearon las imágenes en miniatura para ser anexadas en el diseño de la página principal de la aplicación como se puede observar en la Figura 2.

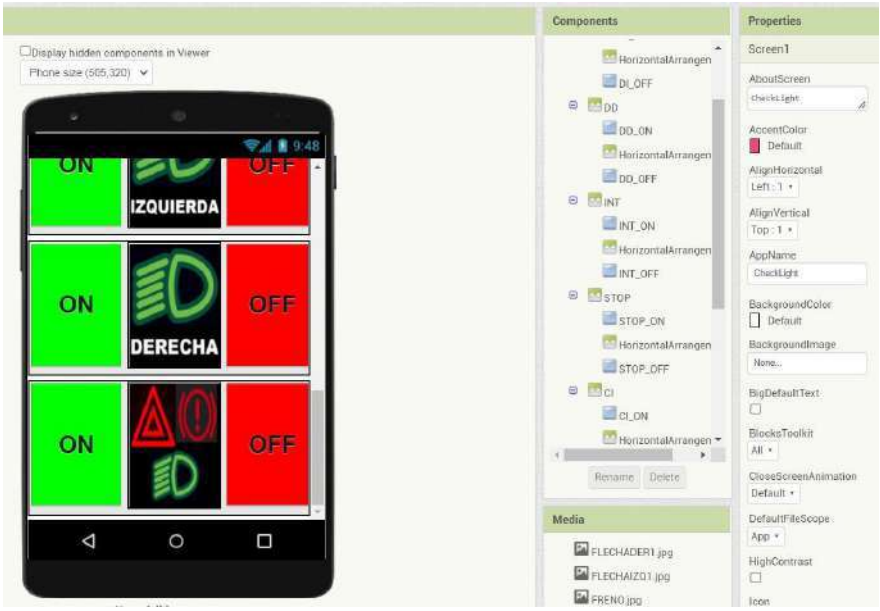


Figura 2. Aplicación móvil en MIT App Inventor.

Cada recuadro envía un carácter, el cual se almacena en la variable establecida en el código de programación para poder realizar la comparativa y ejecutar la orden de activación de los relevadores para activación de una luz específica; es relevante indicar que se tomó la determinación de implementar letras para las variables en vez de números, puesto que en la prueba piloto que se realizó se generaba un conflicto con la lógica de programación y provocaba que los relevadores se activaran de manera irregular y no deseada, dando como resultado la programación de la Figura 3.

Figura 3. Código de programación por bloques de MIT App Inventor.

Se usaron las letras “A” hasta la “N” para la interacción y comunicación inalámbrica entre el dispositivo móvil y el dispositivo “CheckLight”. Una vez que se realizó el diseño de la interfaz gráfica de usuario y la programación del código de bloques, se procedió a compilar y construir el programa, teniendo como resultado un archivo de extensión .apk para instalar en cualquier dispositivo móvil con sistema operativo Android.

2.3 Desarrollo del código de programación

Con la finalidad de realizar un prototipado ágil, eficiente y flexible a los cambios [8], se decidió programar en el IDE de Arduino, definiendo 6 pines configurados como entrada para la futura actualización cuando se incluyan los interruptores físicos con los que cuenta el dispositivo, 5 pines configurados como salida para la activación de los relevadores que controlan la etapa de potencia y 2 pines para establecer la comunicación inalámbrica entre el dispositivo móvil y el dispositivo “CheckLight”. En total se dimensionó usar 13 pines, por lo que se designó utilizar la placa Arduino Nano, la cual cuenta con los pines necesarios además de su pequeña proporción, perfecta para realizar un sistema embebido compacto [9].

El código da inicio con el apagado de todas las luces, en la parte de bucle del código se realizó en dos partes: en la primera se implementaron condicionales de tipo if anidadas (if - else if) para la comparativa de los valores de los interruptores físicos. En la segunda parte se usó la condicional switch - case para realizar la comparativa de los valores recibidos del dispositivo móvil por medio del Bluetooth. Para hacer el código más compacto se emplearon funciones, evitando de este modo la repetición manual de la activación/desactivación de los relevadores, ayudando mucho a reducir el tamaño del código y depurar errores potenciales [10]. Como se puede observar en la Figura 4, el primer grupo de las funciones agrupa el código para encender las luces y en la segunda parte de las funciones se agrupa el código para apagar las luces.

```
//Declaración de pines global//
//Variables para activacion de relevadores
int SDD=A0;   // Direccional derecha SALIDA
int SDI=A1;   // Direccional izquierda SALIDA
int SSTOP=A2; // Stop SALIDA
int S4D=A3;   // Cuartos derecho SALIDA
int S4I=A4;   // Cuartos izquierdo SALIDA

//Variables para estado de switches
int EDD=2;    // Direccional derecha ENTRADA
int EDI=3;    // Direccional izquierda ENTRADA
int EINT=4;   // Intermitentes ENTRADA
int ESTOP=5;  // Stop ENTRADA
int E4D=6;    // Cuartos derecho ENTRADA
int E4I=7;    // Cuartos izquierdo ENTRADA

//Variable para bluetooth
char est;     // Variable para almacenar los valores de bluetooth

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(SDD,   OUTPUT);
  pinMode(SDI,   OUTPUT);
  pinMode(SSTOP, OUTPUT);
  pinMode(S4I,   OUTPUT);
  pinMode(S4D,   OUTPUT);

  pinMode(EDD,   INPUT);
  pinMode(EDI,   INPUT);
  pinMode(EINT,  INPUT);
  pinMode(ESTOP, INPUT);
  pinMode(E4I,   INPUT);
  pinMode(E4D,   INPUT);

  FTODO0();
}
```

Figura 4. Código de programación del microcontrolador IDE Arduino.

2.4 Etapa de control y potencia

Para la etapa de control, se diseñó una Placa de Circuito Impreso (PCB por sus siglas en inglés) bajo los requerimientos específicos del proyecto en el software Fritzing [11], en esta se colocó el Arduino Nano, un puente de diodos de 4 Amperios, el módulo Bluetooth HC-05, tres reguladores de voltaje LM7805 en paralelo para aumentar la corriente (configuración requerida para alimentar la totalidad de los componentes) y por último se usan terminales tipo block de tornillo para interconectar el módulo de relevadores y los interruptores. Se usó el color rojo para denotar una alimentación positiva, el color negro para la tierra y el color verde para señales (Figura 5).

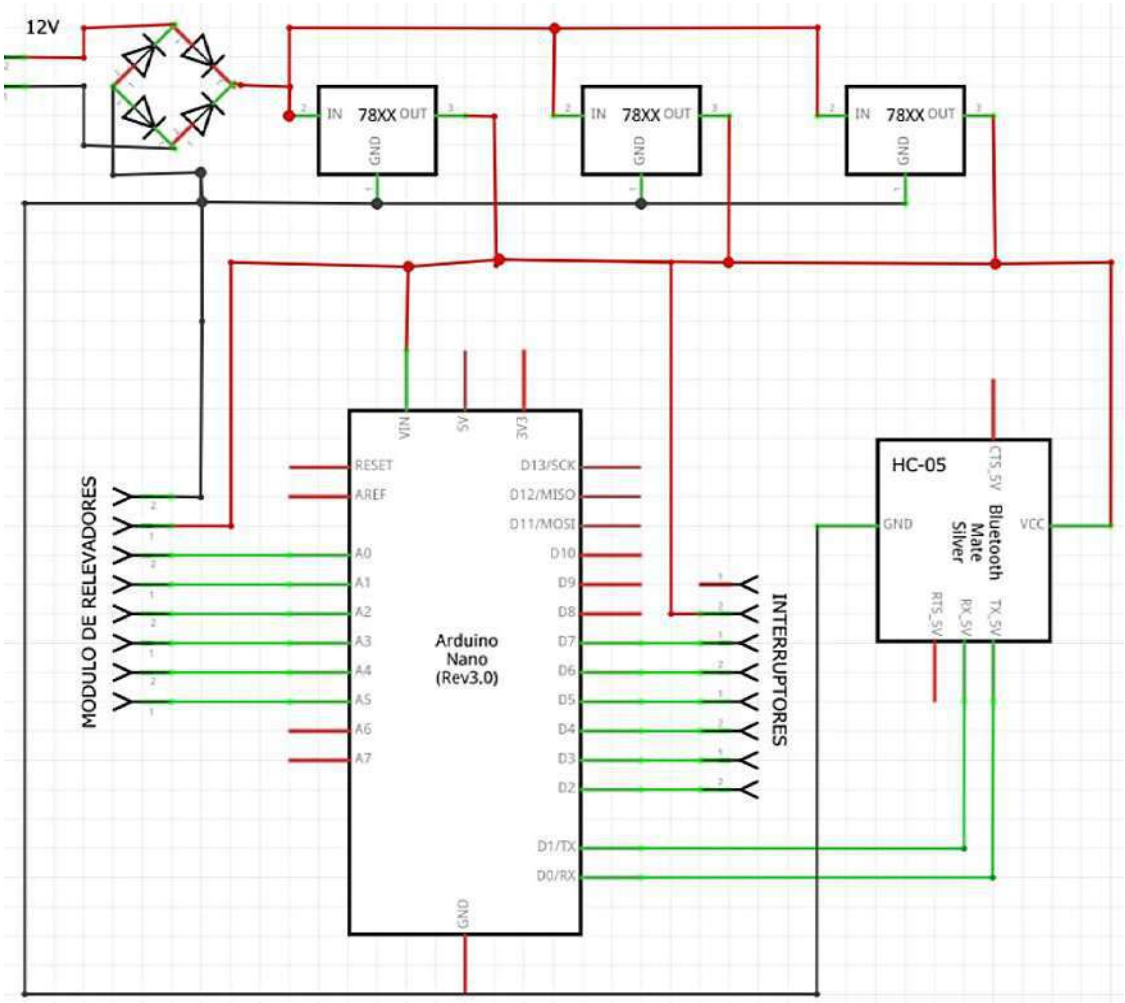


Figura 5. Diagrama de cableado de la etapa de control en Fritzing.

Una vez diseñado el circuito electrónico se procedió a diseñar el Layout que respecta a la PCB, utilizando nuevamente el software Fritzing debido a su entorno simplificado pero profesional, se tiene como resultado un diseñó realizado en una placa de 65 mm de ancho por 65mm de largo, tratando en todo momento de realizar un diseño lo más compacto posible. Dentro de la PCB fueron ubicados los elementos dimensionados en el diagrama propuesto, como se observa en la Figura 6.

Una vez realizado el diseño, se procedió a su preparación para imprimirlo en hojas de tipo transfer, exportando el diseño en formato PDF y usando el archivo generado respectivamente (Figura 7).

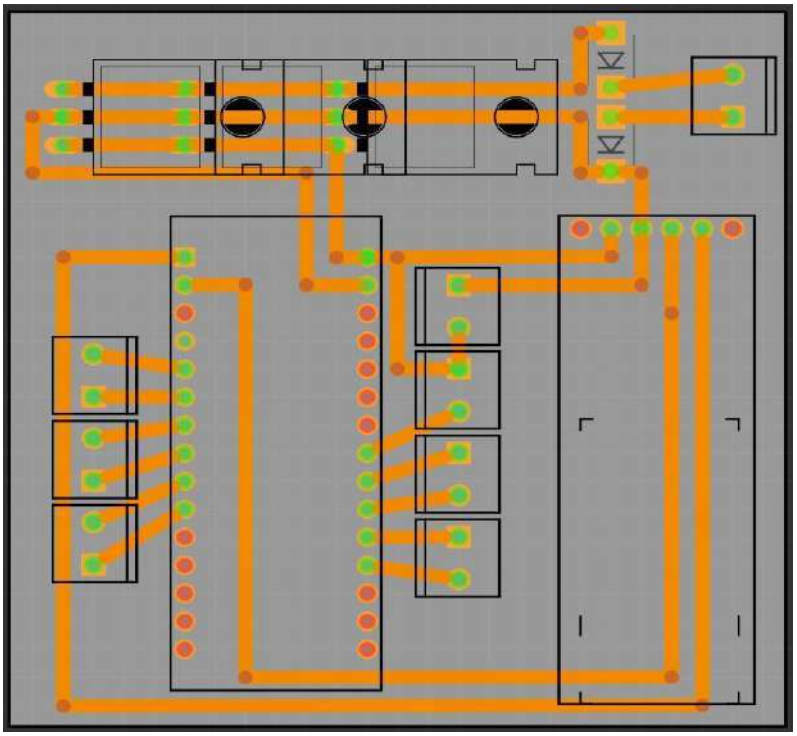


Figura 6. Diseño Layout de la placa electrónica.

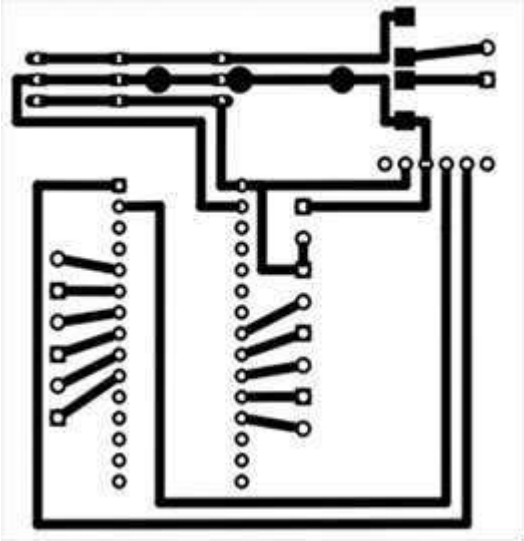


Figura 7. Plantilla para transferencia a placa de cobre.

El circuito se fabricó mediante procesos convencionales básicos, impreso en hojas de tipo transfer en una impresora láser, una vez obtenido el diseño, se procedió a la transferencia del circuito a la placa de cobre con procesos de trasferencia de calor con herramientas domésticas; una vez que se tuvo el diseño ya transferido en la placa de cobre, se revisó de manera detallada para buscar algún elemento que pudiera dificultar el funcionamiento futuro de la placa; una vez terminada la revisión, se procedió a colocar la placa en ácido férrico ($FeCl_3$) para remover el excedente no deseado de cobre [12]. Una vez

eliminado dicho excedente de cobre, se procedió a realizar el detallado final y revisión de continuidad de la pista, para dejar lista la placa para el ensamble de los elementos electrónicos (Figura 8).

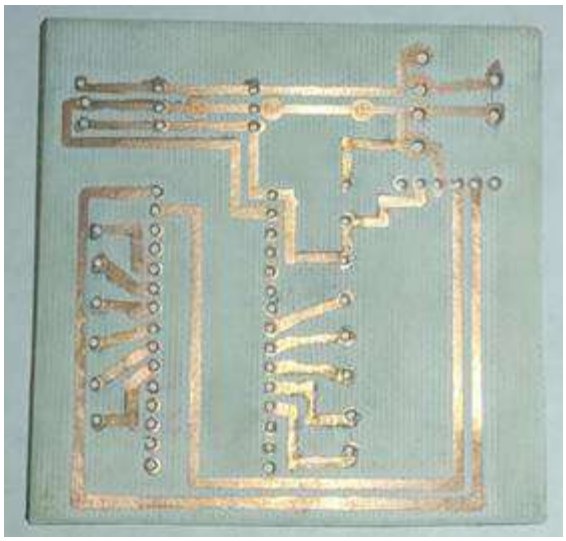


Figura 8. Fabricación de la placa electrónica.

Para la etapa de potencia originado de las altas corrientes de operación, se decidió no usar una PCB para la alimentación de dicha etapa, en su lugar se emplearon los cables conductores directos con terminales robustas hacia la batería. Esta etapa quedó compuesta por los relevadores (Figura 9) como elemento de control de potencia en conjunto con fusibles para protección de estos mismos contra corrientes altas y cortocircuitos. La alimentación de esta etapa viene directamente de la batería, pero es controlada por la etapa de control anteriormente diseñada, siendo relevadores destinados a distribuir la alimentación al conector de 7 vías y de esta manera alimentar el sistema eléctrico del remolque.

Figura 9. Etapa de potencia a conector SAE J560.
https://es.class8truckparts.com/electrical/trailer-connectors/receptacles-sockets-trailer-connectors.html.

2.5 Diseño y fabricación de carcasa

El diseño de la carcasa de protección del dispositivo se realizó en SolidWorks como herramienta CAD/CAM (Figura 10). Se tomaron las medidas del dispositivo y se propuso un diseño sencillo pero eficiente para la carcasa, teniendo como resultado la forma de prisma rectangular con las medidas de 18 x 6.5 x 11 cm, brindando fácil acceso a los componentes electrónicos y/o mejoras en el prototipo a futuro.

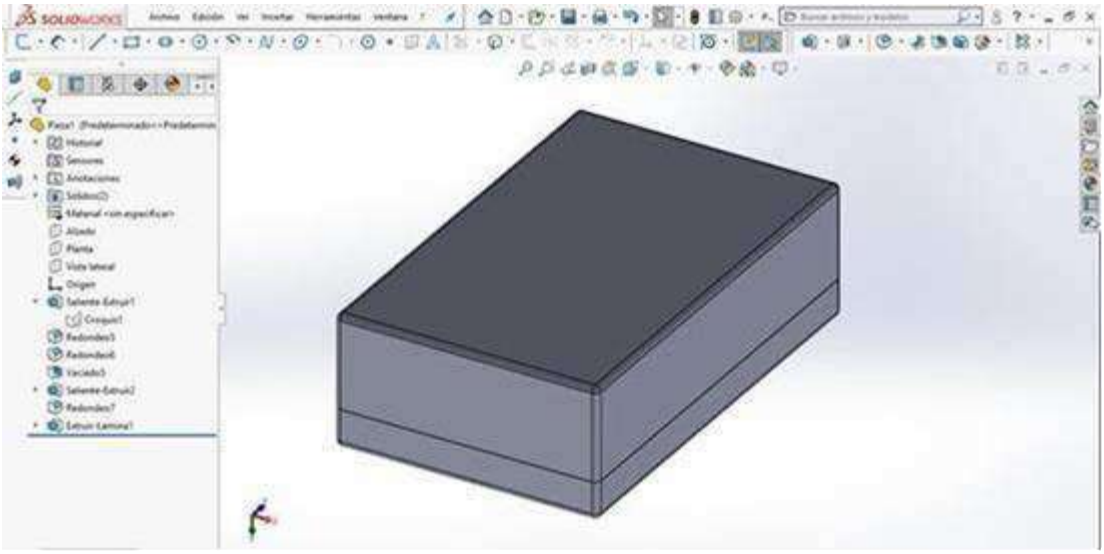


Figura 10. Diseño de la carcasa.

Finalmente, para su fabricación y al ser un prototipo, se propuso utilizar tecnología FDM (Fused Deposition Modeling), brindando características personalizables y ajustadas a los requerimientos propuestos, para lo cual apoyados en una Impresora 3D [13], se logró una carcasa resistente y funcional a las necesidades tanto del entorno como del circuito a contener (Figura 11).

Figura 11. Carcasa terminada.

2.6 Ensamble del sistema

Realizando como primer paso el ensamble del PCB con los componentes electrónicos correspondientes al diagrama previamente diseñado, se soldaron cada uno de los componentes, verificando en todo momento la no existencia de un corto circuito entre pistas y/o componentes debido a la soldadura, dando como resultado la placa mostrada en la Figura 12.

Una vez que los elementos electrónicos se soldaron, se procedió al ensamble de los conductores encargados de alimentar el circuito de control y la etapa de potencia, para posteriormente ensamblar el conector de 7 vías con la etapa de potencia. Finalmente se instalaron los elementos correspondientes dentro de la estructura de protección para dar por concluido el dispositivo “CheckLight” (Figura 13).

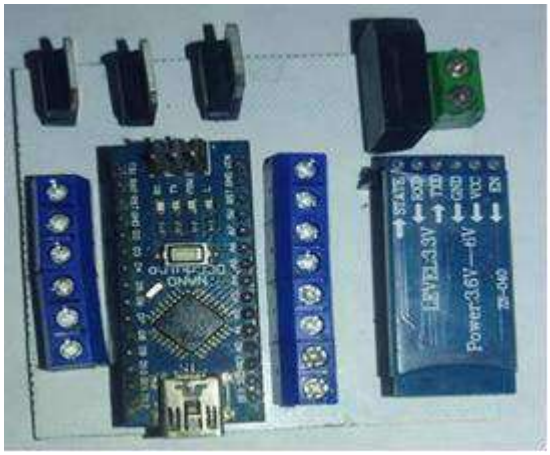


Figura 12. Placa ensamblada con los componentes electrónicos.

Figura 13. Prototipo "CheckLight" terminado.

2.7 Diseño de simulador de remolque

Para la realización de una prueba piloto segura se simuló un cuadro de lámparas de remolque, con la finalidad de asegurar el correcto funcionamiento de nuestro prototipo y así evitar ya en campo una posible confusión a futuro acerca de si realmente el dispositivo "CheckLight" se encuentra activando o desactivando los relevadores de forma correcta. El diseño se realiza mediante procesos de manufactura convencionales, soldadura y cortes con esmeriladora, posteriormente se instalan los componentes reales que encontramos en los diferentes tractocamiones: cuatro focos, dos para direccionales y dos para frenos, con las luces cuartas integradas en todos los focos, de igual manera

se tiene un conector tipo hembra con el protocolo SAE J560 para realizar la conexión de los focos con el conector en un ambiente controlado lo más semejante a la realidad (Figura 14).

Figura 14. Simulador de sistema lumínico de remolque.

2.8 Pruebas

Con la finalidad de validar la funcionalidad del prototipo se procedió a realizar tres diferentes tipos de pruebas:

a. La primera es realizada sin carga, que tiene como finalidad corroborar el correcto accionamiento de los elementos de potencia (relevadores) sin carga, enviando las señales de control mediante la conexión de la Aplicación móvil vía Bluetooth con estos elementos [14] (Figura 15).

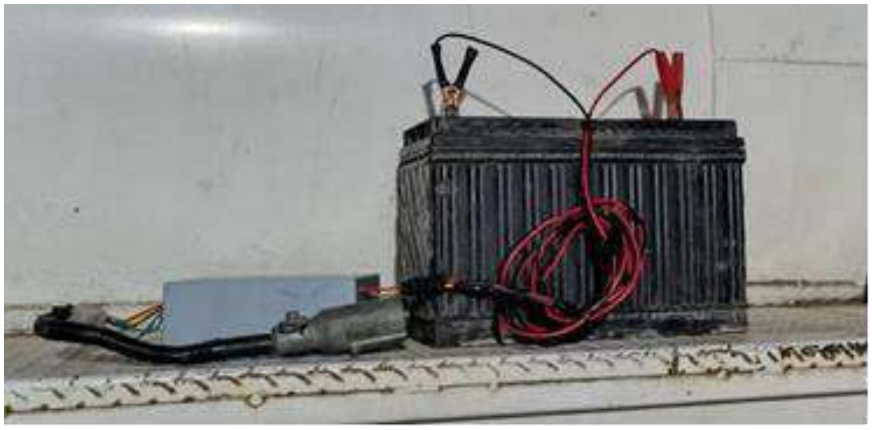


Figura 15. Prueba sin carga.

b. La segunda consiste en una prueba con carga en simulador, esta es empleada con el dispositivo “CheckLight” en el simulador previamente diseñado para comprobar el correcto funcionamiento del dispositivo, en un ambiente controlado semejante a la realidad que se puede observar en la Figura 16. Con esta prueba se puede verificar en su totalidad el funcionamiento del prototipo antes de ir a condiciones de campo reales.

c. La tercera y última corresponde a una prueba con carga práctica en campo (con un remolque real), esto tiene como objetivo el comprobar el funcionamiento del sistema eléctrico del remolque y los beneficios de este en su implementación (Figura 17).

Figura 16. Prueba con carga en simulador.

Figura 17. Prueba con carga real.

3. Resultados

Para el caso de la primera prueba, se presentó una falla en la etapa de control, originada de un cortocircuito, afectando de manera poco significativa las señales para activar o desactivar los relevadores sin carga, provocando únicamente un funcionamiento irregular sin responder a los controles inalámbricos. Una vez delimitado el origen de la falla, se procedió a su corrección y nuevamente corroborar su funcionamiento, funcionando como era lo esperado de manera inicial. Con lo anterior, se puede definir que, a pesar de haber realizado todas las pruebas eléctricas al momento del ensamble, el

hecho de reducir tan significativamente las dimensiones del PCB y el no contar con herramientas para microsoldadura, origina fallas potenciales por corto circuito en la placa diseñada.

Para la segunda prueba, se obtuvieron resultados positivos, logrando encender la totalidad de las luces del simulador fabricado, teniendo como único defecto inicial la inversión de dos cables (la direccional derecha y la direccional izquierda), es decir, al momento de seleccionar la opción para encender la direccional derecha, se encendía la izquierda y viceversa. Para este caso fue necesario rectificar las conexiones realizadas en base al protocolo SAE J560 y volver a probar el prototipo, para finalmente corroborar su funcionalidad total.

La tercera prueba y última prueba, que se denominó de carga práctica, se conectó prototipo a un remolque de tipo caja seca, y se hicieron las pruebas correspondientes en dos remolques, el primero se sabía que funcionaba correctamente y el segundo no. Para el caso del primero los resultados obtenidos fueron los esperados (sistema de luces totalmente funcionales), demostrando que el sistema eléctrico de aquel primer remolque estaba en buen estado; seguidamente se probó con el remolque que se sabía presentaba fallas en su sistema eléctrico y que al momento de conectar el prototipo se corroboraron dichas fallas.

Finalmente, se realizaron 25 pruebas a remolques seleccionados al azar de un parque vehicular de 50 tractocamiones (50%), de los cuales 14 presentaron fallas en el sistema de luces, lo que representa un total de 56% de remolques con anomalías en su sistema lumínico. De encontrarse circulando en carreteras los anteriores remolques hubieran significado pérdidas por concepto de multas por aproximadamente $56,000 pesos mexicanos y de considerarse la totalidad del parque vehicular con el porcentaje de fallas estudiadas, se estiman pérdidas por $112,000 pesos mexicanos.

4. Conclusiones

El diseño del prototipo “CheckLight” es una clara muestra de integración de tecnologías, desarrollo de interfaces y diseño de Aplicaciones móviles aplicadas a una problemática real. Si bien no representa la creación desde cero de un proyecto, sino la integración de diferentes aristas tecnológicas, con el presente prototipo se representa la esencia de la Mecatrónica: soluciones tecnológicas para resolver problemas del día a día, como lo son los accidentes que involucran fallos en sistemas lumínicos en transportes de cargas pesadas y las pérdidas económicas en empresas de autotransporte.

Finalmente, es importante señalar la importancia de la vinculación realizada para el desarrollo del prototipo con la empresa Tecnotransportes Especializados S.A. de C.V., teniendo que realizar visitas constantes con la empresa vinculada para conocer sus necesidades, estableciendo metas y objetivos comunes, como lo fue identificar la necesidad de un dispositivo capaz de realizar revisiones periódicas al sistema eléctrico de los remolques, previniendo accidentes en carretera así como multas derivadas por faltas a la ley del autotransporte, siendo para ellos de utilidad, una herramienta que pueda sustituir el tractocamión para generar las señales necesarias de activación del sistema lumínico, y que debido a la longitud de los mismos remolques resulta indispensable realizar el control de las señales de mando de manera inalámbrica, facilitando de esta manera la tarea de revisión, todo lo anterior teniendo en cuenta que para las grandes empresas con parques vehiculares mayores a 100 unidades tipo remolque, resulta en un ahorro de tiempo y recurso económico, agilizando la verificación de sus diferentes unidades en un periodo menor de tiempo.

Referencias

[1] De Estadística Y Geografía, I. N. (s. f.). Banco de Indicadores. https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?ind=1006000039&tm=6#D1006000039

[2] Lighting and marking of agricultural equipment on highways. (2019). *elibrary.asabe.org*. https://doi.org/10.13031/s2000.2013
[3] *J560_202002: Primary and auxiliary seven conductor electrical connector for Truck-Trailer Jumper Cable - SAE International*. (s. f.). https://www.sae.org/standards/content/j560_202002/
[4] *Publications & Standards*. (s. f.). https://www.asabe.org/Publications-Standards/Standards-%20Development/National-Standards
[5] Torné, I. G., Choy, S. L., & Del Castillo Serpa, A. (2018). *Gestión del mantenimiento a interruptores de potencia.* Estado del arte. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería. https://doi.org/10.4067/s0718-33052018000200192
[6] Harper, G. E. (2002). *Fundamentos de Protección de Sistemas Eléctricos Por Relevadores*, 2a Edición. Editorial Limusa.
[7] *Teach with app Inventor*. (s. f.). https://appinventor.mit.edu/explore/teach
[8] Artero, O. T. (2022). *ARDUINO. Curso práctico de formación*. Alfaomega.
[9] Peña, C. (2020). *Descubriendo Arduino*. Buenos Aires: Six Ediciones.
[10] Goilav, N., & Geoffrey, L. O. I. (2016). *Arduino: Aprender a desarrollar para crear objetos inteligentes.* Ediciones ENI.
[11] *PCB design with Fritzing*. (s. f.). https://fritzing.org/learning/tutorials/designing-pcb/#anchor1
[12] Malvino, A. P., & Bates, D. J. (2007a). *Principios de electrónica*. McGraw-Hill Education.
[13] Rodriguez Vidal, C. (2015). *Diseño mecánico con Solidworks*. Grupo Editorial RA-MA
[14] Martínez, F. J. C., & Marín, S. T. (2011). *Interoperabilidad dinámica de servicios mediante comunicaciones inalámbricas bluetooth en entornos urbanos y sistemas inteligentes de transporte* (Doctoral dissertation, Universidad de Sevilla).

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 28, pp. 364 – 374
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Diseño y simulación de una cámara de muestreo de contaminantes atmosféricos

Hernández Zavala Antonio[1*], Sáenz Ramírez David Leonardo[2]
y Caraveo Cacep Miguel Antonio[1]

[1]Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Querétaro, Av. Cerro Blanco 141, Colinas del Cimatario, 76090 Querétaro, México,
[2]Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica unidad Culhuacán, Av. Sta. Ana 1000, San Francisco Culhuacán, Coyoacán, 04440 Ciudad de México, CDMX
*anhernandezz@ipn.mx

Resumen

Los sistemas de medición de la calidad del aire son hoy en día una necesidad en todo el planeta debido a las graves consecuencias que los altos niveles de contaminación pueden tener sobre la población. Muchas ciudades de primer mundo, conocidas como ciudades inteligentes, hacen uso de las tecnologías de la información y la comunicación para ofrecer servicios de alta calidad a la población, entre ellos sistemas de control de la calidad del aire, con el fin de tomar medidas para prevenir enfermedades y garantizar que las actividades al aire libre puedan llevarse a cabo de forma segura. Las ciudades de los países en desarrollo no suelen disponer de recursos suficientes para invertir en estaciones dedicadas a la medición de la contaminación debido al elevado costo de diseño, implementación y mantenimiento, por ello, es necesario contar con alternativas eficientes que no requieran una elevada inversión. En este trabajo se presenta una propuesta de diseño de una cámara de muestreo de contaminantes atmosféricos prevista para su implantación en estaciones de vigilancia ambiental utilizando sensores de bajo costo. Los resultados del diseño fueron validados mediante simulación para determinar la mejor trayectoria de flujo y comportamiento de velocidad aún con efecto vórtice entre la toma de muestra y la cámara para establecer el diseño de cámara más eficiente.

Palabras clave: Detección de partículas individuales; contaminación atmosférica; sensores de bajo costo

1. Introducción

La contaminación atmosférica se ha convertido en un tema de gran interés y preocupación a medida que crece la población mundial y, en consecuencia, los contaminantes que genera el aumento del número de vehículos, fábricas y otros medios de transporte. Este crecimiento tiene un impacto directo en la salud de los habitantes de una región, ya que también aumenta considerablemente la presencia y acumulación de gases en el aire y de partículas en suspensión. Los principales gases contaminantes que se encuentran en el ambiente son el ozono (O3), el dióxido de azufre (SO2), el dióxido de nitrógeno (NO2) y el monóxido de carbono (CO). También hay partículas en suspensión o material particulado (PM), que son una mezcla de partículas líquidas y sólidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire. Algunas de estas partículas son detectables a simple vista, como el polvo, el hollín o el humo, pero también hay partículas más pequeñas que pueden dividirse de la siguiente manera según su tamaño:

- Partículas de diámetro inferior a 2.5 µm.
- Partículas gruesas con un diámetro superior a 2.5 µm.

- Partículas de humo, que tienen un diámetro de entre 0,001 y 1 µm, compuestas por condensación, sublimación o reacciones químicas, y que a veces se designan como humo.
- Partículas de vapor, que tienen un diámetro entre 0,1 - 10 µm., formadas por condensación, y tienen un diámetro considerablemente mayor en comparación con las partículas de humo.

De estas partículas, las dañinas son aquellas que son lo suficientemente pequeñas como para ser inhaladas en los pulmones, estas son PM10 y PM2.5. Por PM10 se refiere a las partículas inhalables que tienen diámetros generalmente de 10 micrómetros o menos. Las fuentes de emisión de estas partículas pueden ser móviles o estacionarias, destacando que el 77,9% de la cantidad total de PM10 emitida procede del polvo en suspensión en la atmósfera. Como fuente minoritaria de contaminación, cabe destacar que el 3,7% del total procede de quemas agrícolas; y el 3,3% es de origen doméstico [1].

Las partículas PM2,5 se refieren a aquellas que son partículas finas inhalables, que generalmente tienen diámetros de 2,5 micrómetros o menos. Las partículas finas pueden proceder de diversas fuentes, como centrales eléctricas, vehículos de motor, aviones, quema de madera en viviendas, incendios forestales, quemas agrícolas, erupciones volcánicas y tormentas de polvo. Algunas se emiten directamente al aire, mientras que otras se forman cuando los gases y las partículas interactúan entre sí en la atmósfera [2].

Aunque estos contaminantes se encuentran en el ambiente, a menudo es difícil identificarlos incluso con los mejores sensores, si el flujo, la altura y la posición de la estación no son los adecuados. Por lo tanto, el desarrollo de una estación de monitoreo de la calidad del aire implica contar con un módulo especial para el muestreo del aire, donde lo primero a considerar es cómo ingresa el aire a la estación y cómo mantener un flujo constante aun cuando los factores ambientales dificulten el ingreso a la estación [3]. En los últimos años se han reportado en la literatura diferentes trabajos científicos con el propósito de contribuir al diseño eficiente de una cámara de muestreo de contaminantes ambientales para su inclusión en estaciones de monitoreo ambiental o de calidad del aire.

El uso de microcontroladores y sensores de bajo costo se ha adoptado en diversas partes del mundo para este tipo de tareas. En 2018, Cavaliere et al. [4] reportaron una propuesta para el desarrollo de una estación de medición de calidad del aire de bajo costo para redes de próxima generación, integraron sensores de CO, CO2, NO2, O3, VOC, PM2,5 y PM10 utilizando una tarjeta Arduino. En 2019, Dissanayaka et al. [5], presentaron un sistema para monitorear y analizar la calidad del aire a través de un enfoque predictivo, el prototipo se implementó para realizar pruebas jerárquicamente utilizando dos sensores de gas diferentes, una tarjeta Arduino Uno y un módulo Wi-Fi. Del mismo modo, en 2020 Yang et al. [6], propusieron un sistema para monitorear la calidad del aire basado en un vehículo aéreo no tripulado (UAV: Unmanned Aerial Vehicle), el sistema utiliza la comunicación inalámbrica para realizar la transmisión de datos y el control remoto e incluye un sitio para el muestreo de detección. En 2021, Goyal et al. [7] propusieron un sistema para la identificación de puntos críticos de contaminación atmosférica (APH: Air Pollution Hotspots) en zonas urbanas mediante la monitorización de datos concentrados. En 2022, García et al. [8] presentaron una propuesta para monitorizar la calidad del aire de forma inteligente a través del Internet de las Cosas (IoT: Internet of Things) para entornos industriales. Su propuesta incluye dos dispositivos precisos para la monitorización en tiempo real de las concentraciones de partículas y gases contaminantes en el aire.

El objetivo de este trabajo es presentar el diseño de una cámara de muestreo de la calidad del aire que pueda ser implementada en estaciones de monitoreo ambiental utilizando sensores de bajo costo. La aportación incluye la validación mediante pruebas simuladas de la propuesta para presentar el diseño con los resultados más adecuados. El artículo está organizado de la siguiente manera: La Sección 2 presenta una revisión de las estaciones de monitorización actuales, así como las estaciones de bajo costo utilizadas recientemente. En la Sección 3 se presentan las consideraciones de diseño de la cámara de adquisición. En la Sección 4 se muestran los resultados de las simulaciones con diferentes parámetros para las familias de sensores para gases ZE12, ZE03 y MQ. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas del trabajo.

2. Sistemas actuales de control de la calidad del aire

En la actualidad, la tecnología desempeña un papel importante en el desarrollo de equipos que permitan una vida más saludable. La obtención de información sobre fenómenos meteorológicos o climáticos y la gestión de grandes volúmenes de información para la toma de decisiones son elementos clave para el desarrollo de sociedades mejor preparadas. Un claro ejemplo de aplicaciones tecnológicas en la vigilancia de la contaminación atmosférica son las estaciones de vigilancia meteorológica y atmosférica en red, conectadas a través de la Internet que permiten conocer la presencia de contaminantes y sus niveles en una región concreta.

Las estaciones de vigilancia atmosférica suelen analizar concentraciones de contaminantes como el ozono, las partículas, el monóxido de carbono, el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno, además de parámetros meteorológicos como la dirección y velocidad del viento, las precipitaciones, la radiación total, etc. Hay dos tipos principales de estaciones de vigilancia: las primeras son las estaciones fijas de vigilancia ambiental, caracterizada por ser de grandes dimensiones y costosas, pero con mediciones muy precisas como se aprecia en la Figura 1. El segundo grupo lo forman las estaciones portátiles, que son de dimensiones considerablemente más pequeñas que las fijas, y sus mediciones tienen un margen de precisión del 95% dependiendo del tipo de sensores que utilicen como la de la Figura 2.

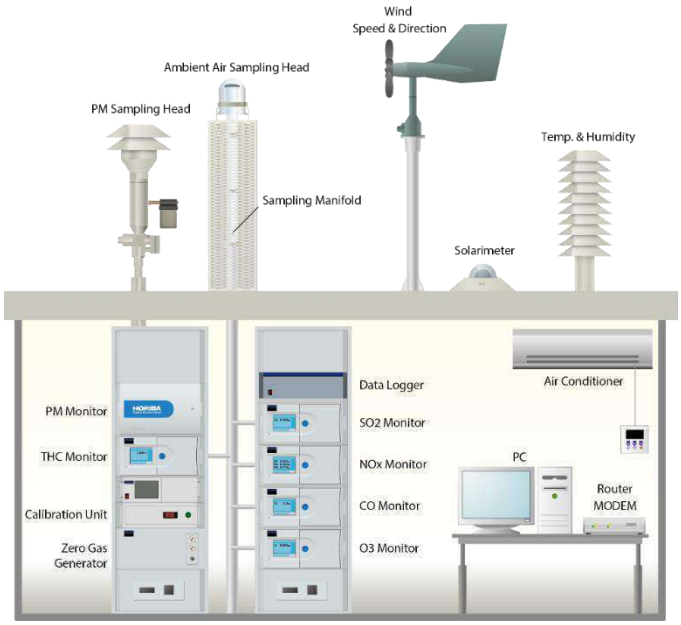


Figura 1. Estación meteorológica [2].

Una estación portátil cumple las funciones básicas de un centro o estación de vigilancia meteorológica. Se compone de tres partes principales, (1) el módulo de electrónica y comunicaciones, (2) el módulo para medición y adquisición, y (3) el módulo de alimentación, las cuales se describen a continuación.

1. Módulo de electrónica y comunicaciones: Está integrado por la parte lógica que procesa los datos de los sensores y los transmite vía módem al ordenador central.

2. Módulo de medición y adquisición: Está integrado por todos los sensores y medidores de la estación, funciona como un arreglo de sensores para recolectar información por medio de una muestra de aire del ambiente y enviar los valores obtenidos a la parte electrónica.

3. Módulo de alimentación: Aquí se integra la fuente de poder, batería o toma de corriente que alimentará las distintas partes del sistema.

Figura 2. Estación portátil de vigilancia ambiental [2].

Tanto las estaciones fijas como las portátiles cuentan con un sistema para la toma de muestras, la principal diferencia entre estas dos radica en el tamaño ya que en una estación portátil existe una cámara exclusiva para todos los gases y en la estación fija se utiliza una cámara para cada contaminante. Existen diferentes variedades de estaciones portátiles dentro de las cuales se puede identificar que el principal problema que enfrentan es la toma de muestra, donde algunos fabricantes dejan los sensores expuestos directamente al ambiente, y por lo general los módulos son aislados de toda la estación para la toma de muestra. La tabla 1 muestra algunos de los sistemas actuales y una breve descripción centrada en su método de muestreo.

Tabla 1. Sistemas utilizados actualmente para medir la calidad del aire y su método de muestreo.

Estación	Descripción
	La estación TM-09 de Tecnometrica Inc. tiene un sistema modular y protección IP65 para funcionamiento en exteriores [9]. El muestreo se realiza mediante una bomba de aspiración que dirige la muestra a un módulo con sensores de O3, SO2, NO2, CO y partículas PM2,5 y PM10.
	La estación qHAWAX de Qaira Inc. es un sistema que utiliza el método de muestreo de exposición de los sensores al exterior para obtener métricas de contaminantes [10]. Dispone de sensores para O3, SO2, NO2, CO, H2S y partículas PM2,5 y PM10.
	La estación de vigilancia Breathe-London es un sistema modular compacto donde el muestreo se realiza mediante la interacción directa del sensor y el entorno, en una sección semi-aislada independiente de los demás módulos [11]. Incluye sensores para O3, NO, NO2, CO y partículas PM2,5 y PM10.

3. Diseño experimental

El desarrollo de la cámara de muestreo de aire requiere evaluar varios factores para su diseño entre los que se incluyen las condiciones ambientales a las que estará sometida, las dimensiones para almacenar el conjunto de sensores y saber cómo se comportará el fluido de trabajo en su interior, así como la mejor forma de captar y devolver el volumen de fluido a la atmósfera. En el proceso de diseño, en primer lugar, se establecieron las consideraciones de presión y temperatura a las que se encontrará el fluido en el exterior como se expresa en (1) - (2).

$$Temperatura: 25°C \ - \ 30°C \tag{1}$$

$$Presión: Min\ 1016\ hPa \ - \ Max\ 1025\ hPa \tag{2}$$

Teniendo en cuenta los datos ambientales, se procedió a calcular los parámetros para obtener la muestra por aspiración con ventilador. Para ello se consideró necesario un caudal de 200 litros/min. El conducto de muestreo será de Policloruro de Vinilo (PVC) C.40. Con estos parámetros fue posible realizar los siguientes cálculos.

$$1\ litro\ por\ minuto\ \left[\frac{l}{min}\right] = \ 0.06\ metros\ cúbicos\ por\ hora\ [m^3/h] \tag{3}$$

$$200\ litros/min\ *\ 0.06\ =\ 12\ m^3/h \tag{4}$$

$$Ø_S = \ 1\ 1/2"$$

Según las tablas de tubería hidráulica PVC C.40. El diámetro útil de la sección corresponde entonces a:

$$Ø_S \ = \ 40.5mm$$

$$Ø_S \ = \ 0.0405m$$

$$A_S \ = 1.288x10^{-3} - 3\ m^2 \tag{5}$$

Para calcular la velocidad, se realizó un despeje.

$$Q = S * V \tag{6}$$

$$V = Q/S \tag{7}$$

$$V = \ (12\ m^3/h)\ /\ (1.288x10^{-3} - 3\ m^2)$$

$$V = \ 9314.96\ m/h \ = \ 9.314km/h \ = \ 2.5874m/s$$

La velocidad de entrada de aire requerida es de 2,58 m/s o 9,314 km/h. Con estos datos, se seleccionó el ventilador de aspiración más adecuado como se muestra en la Figura 3.

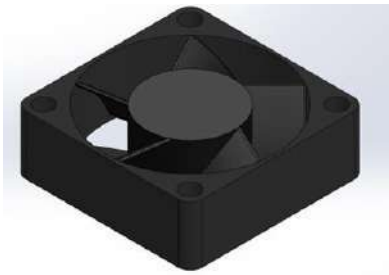
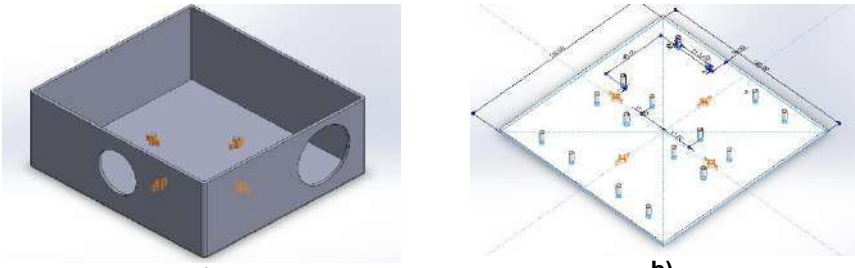


Figura 1. Ventilador de la cámara de gases.

Tabla 2. Valores requeridos para el ventilador seleccionado en relación con los valores comerciales del ventilador.

	Ventilador	Q [l/min]	V [m/s]	v [m^3]	Renovaciones por hora
Valores requeridos	Ø 33.96mm	200	2.58	0.00137	8759.12
Valores comerciales	Ø 30mm	277.438	3.59	0.00137	12150.51

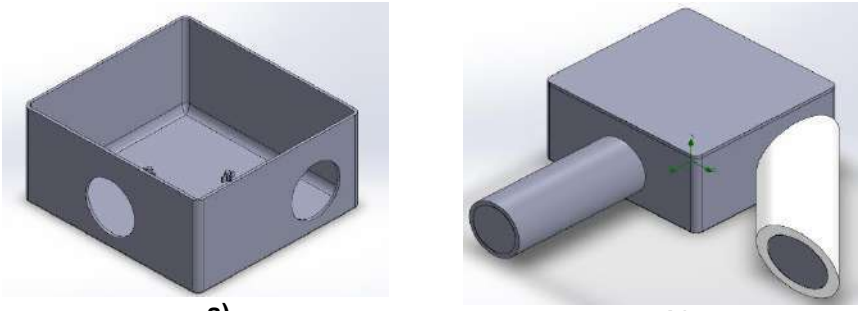
Simultáneamente con la selección del ventilador se trabajó en la construcción de la cámara de gases considerando las dimensiones internas para poder albergar los diferentes sensores de gas que se han dividido en tres familias: MQ, ZE03 y ZE12, y que pueden ser montados en una base intercambiable para cada familia de sensores en la cámara de gases, como se muestra en la Figura 4.



a) b)

Figura 2. a) Cámara de gases, b) Placa de montaje de los sensores.

El diseño inicial de la cámara 1 tiene unas dimensiones de (135x145x70) mm, sin embargo, como se mostrará en la Sección 4, generó un comportamiento no deseado en el flujo, por lo que se creó una segunda cámara añadiendo un redondeo interno de 5 mm en sus esquinas y manteniendo las dimensiones internas, como se muestra en la Figura 5. Finalmente, se agregaron tubos de succión y escape de $1\,{}^{1}/_{2}$ pulgadas a la cámara de gases, que con el ventilador seleccionado permite el caudal requerido y ayuda a lograr un flujo uniforme desde la boca de succión hasta la cámara de gases.



a) b)

Figura 3. a) Cámara de gases número 2 (con redondeo), b) Cámara de gases número 2 con tubos de admisión y escape.

4. Resultados

Para validar el diseño de la cámara de gases, se realizaron una serie de simulaciones con las tres familias de sensores para gases, ZE03, ZE12 y MQ, considerando el comportamiento del flujo, los puntos máximos y mínimos de temperaturas, presión y velocidad del fluido. Para ello, se consideraron tres zonas en el recorrido de la trayectoria del fluido: Entrada, Centro y Fondo; y se utilizaron dos modelos de cámaras de gases, con y sin esquinas redondeadas.

Fue posible observar que la velocidad en el punto uno se reduce casi una unidad en la cámara de gases con redondeo, situándose una velocidad mayor en la zona de escape respecto a la zona de muestreo en el punto dos, mientras que en la cámara sin redondeo la velocidad máxima se concentra en el centro de la cámara, en la cámara con redondeo el valor se sitúa entre 4 y 5 unidades (Figura 6). El punto tres, en cambio, en la cámara sin redondeo, sigue manteniendo el punto de velocidad máxima, como en las zonas 1 y 2, mientras que en la que contiene el redondeo, está por debajo de 3m/s. Se puede observar entonces que, cuando hay redondeo, la velocidad en el flujo de aire permanece uniforme en la cámara, manteniendo las velocidades máximas en el tubo de escape en comparación con la que no tiene el redondeo que presenta una velocidad uniforme mayor en la cámara (Figura 7). En cuestión de temperaturas, son muy similares, mientras que las presiones presentan una variación mínima.

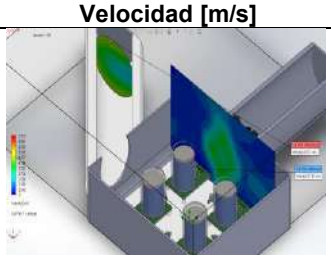
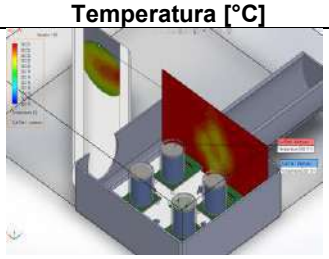
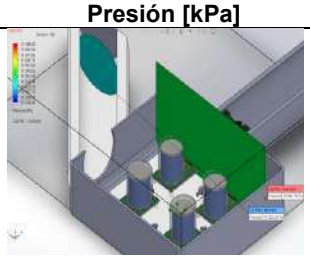
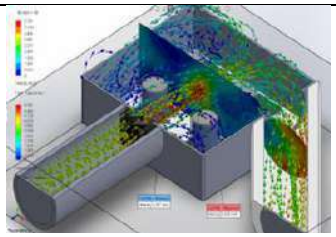
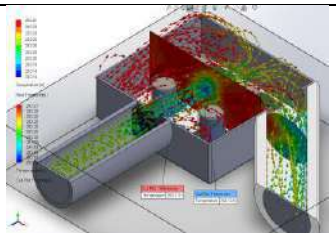
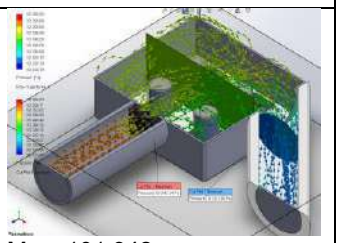
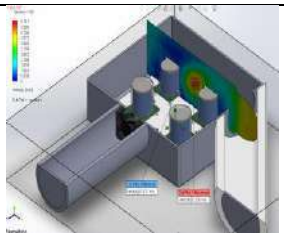
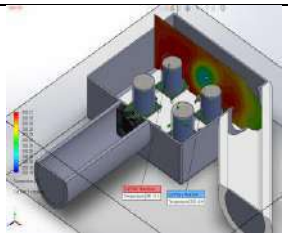
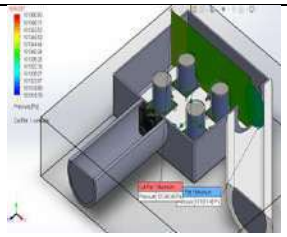
Zona	Velocidad [m/s]	Temperatura [°C]	Presión [kPa]
1	 Max: 4.872 Min: 0.143	 Max: 20.06 Min: 20.04	 Max: 101.342 Min: 101.325
2	 Max: 5.525 Min: 0.207	 Max: 20.06 Min: 20.04	 Max: 101.342 Min: 101.321
3	 Max: 5.235 Min: 0.327	 Max: 20.06 Min: 20.04	 Max: 101.343 Min: 101.331

Figura 6. Resultados de la simulación 1 para la familia de sensores ZE03 en la cámara de gases número 1.

Se observó que en el caso de la cámara de gases para el sensor ZE12, las velocidades máximas son similares en la zona 1 para ambas cámaras. Sin embargo, para las zonas 2 y 3 en la cámara sin redondeo la velocidad se mantiene entre 5 y 6 unidades, la cámara redondeada disminuye su velocidad en la parte de la cámara y se produce un aumento de velocidad en su tubo de escape.

En cuanto a las presiones y temperaturas, su comportamiento es prácticamente el mismo como se observa en la Figura 8.

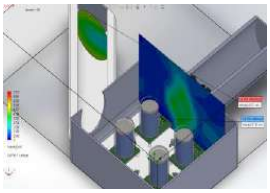
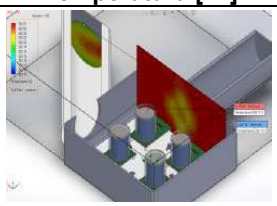
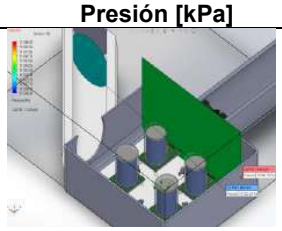
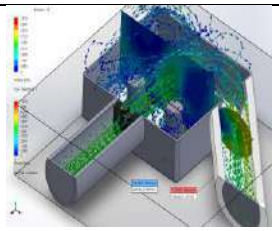
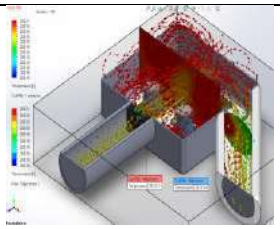
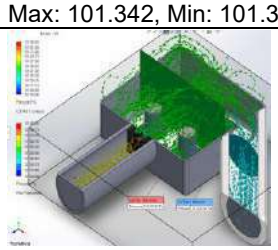
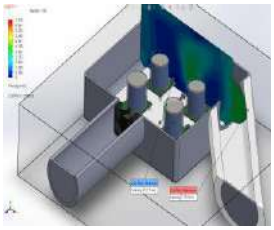
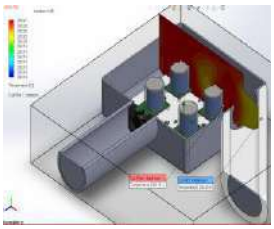
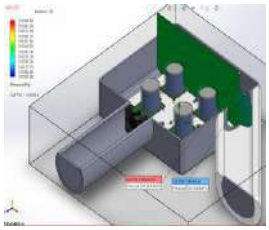
Zona	Velocidad [m/s]	Temperatura [°C]	Presión [kPa]
1	 Max: 4.872, Min: 0.143	 Max: 20.06, Min: 20.04	 Max: 101.342, Min: 101.325
2	 Max: 5.315, Min: 0.086	 Max: 20.06, Min: 20.04	 Max: 101.342, Min: 101.320
3	 Max: 3.703, Min: 0.217	 Max: 20.06, Min: 20.04	 Max: 101.343, Min: 101.329

Figura 7. Resultados de la simulación 2 para la familia de sensores ZE03 en la cámara de gases número 2.

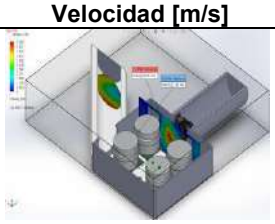
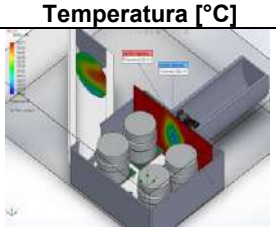
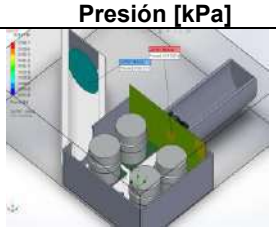
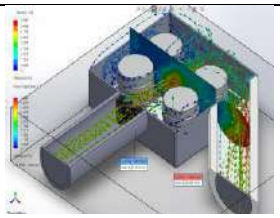
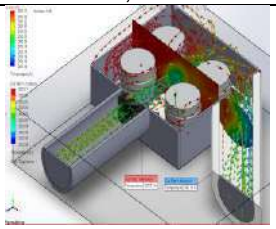
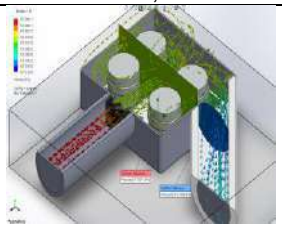
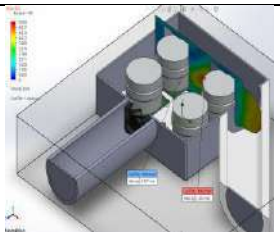
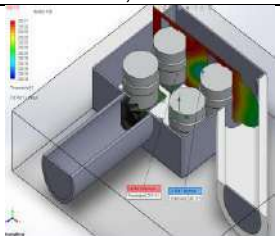
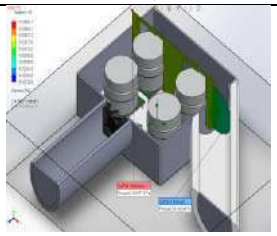
Zona	Velocidad [m/s]	Temperatura [°C]	Presión [kPa]
1	 Max: 5.841, Min: 0.209	 Max: 20.06, Min: 20.04	 Max: 101.324, Min: 101.347
2	 Max: 5.895, Min: 0.224	 Max: 20.06, Min: 20.04	 Max: 101.347, Min: 101.319
3	 Max: 5.282, Min: 0.437	 Max: 20.06, Min: 20.04	 Max: 101.347, Min: 101.329

Figura 8. Resultados de la simulación 1 para la familia de sensores ZE12 de la cámara de gases número 1.

En la simulación de resultados para la familia ZE12 (Figura 9), se observó que el flujo se comporta de forma muy similar. Aquí, en comparación con los sensores ZE03, el efecto vórtice es menos intenso y hay menos recirculación, pero del mismo modo concentra las velocidades máximas en la parte central de la cámara.

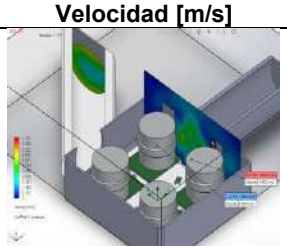
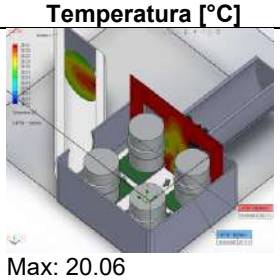
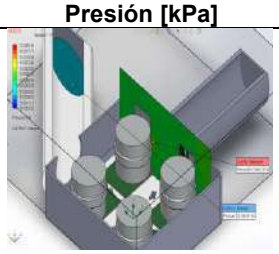
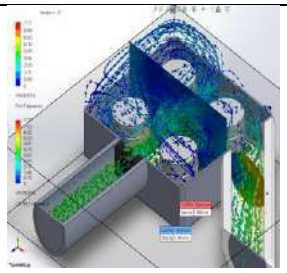
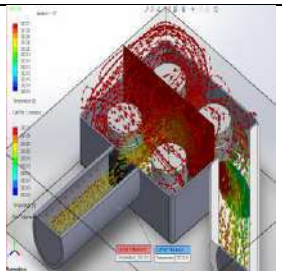
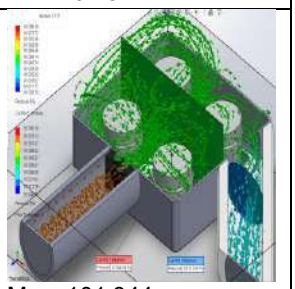
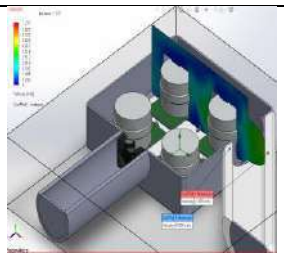
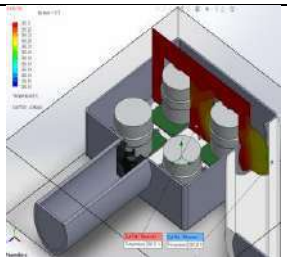
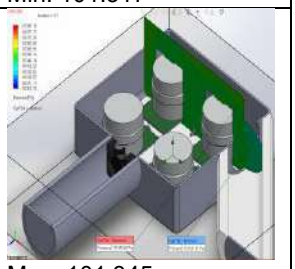
Zona	Velocidad [m/s]	Temperatura [°C]	Presión [kPa]
1	 Max: 5.562 Min: 0.054	 Max: 20.06 Min: 20.04	 Max: 101.348 Min: 101.324
2	 Max: 5.988 Min: 0.148	 Max: 20.05 Min: 20.04	 Max: 101.344 Min: 101.317
3	 Max: 4.676 Min: 0.288	 Max: 20.06 Min: 20.05	 Max: 101.345 Min: 101.331

Figura 9. Resultados de la simulación 2 para la familia de sensores ZE12 en la cámara de gases número 2.

Para la familia de sensores MQ, al igual que en los casos anteriores, se observó que, al generar el redondeo, la velocidad máxima se encuentra en el tubo de escape y no en la cámara de gases como inicialmente sin el redondeo. Los flujos tienen un comportamiento similar en el interior de la cámara cuando se generan vórtices y recirculación de aire con velocidades que oscilan entre 0,099 m/s y 5,8 m/s. En términos de temperaturas y presiones, los valores son similares, pero el flujo presenta cambios (Figura 10).

En el mismo sentido, para los sensores de la familia MQ, se observó un comportamiento similar en cuanto a las líneas de flujo que pasan desde la toma de aspiración hasta la primera pared, y es en esta pared donde se rompen, generando recirculaciones y vórtices. Al existir un mayor volumen vacío debido a las dimensiones de estos captadores, el número de recirculaciones presentes es mayor que el de las familias anteriores. Un aspecto que destacar es que, al igual que en las anteriores familias de sensores, el flujo presenta velocidades máximas en la parte central de la cámara y en el tubo de escape, quedando las más bajas en los alrededores de la cámara (Figura 11).

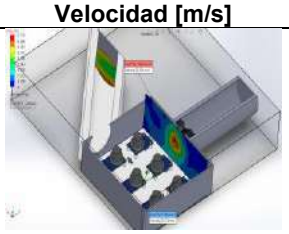
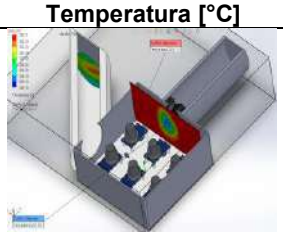
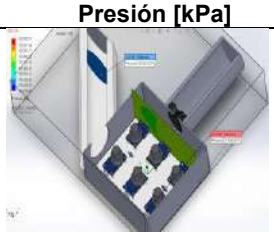
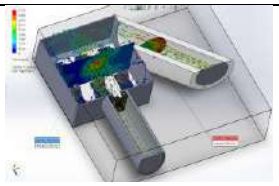
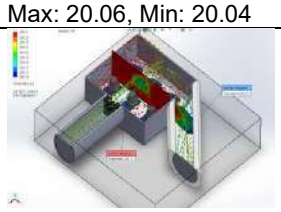
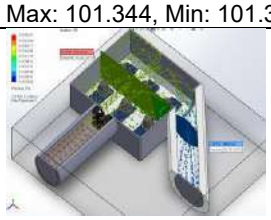
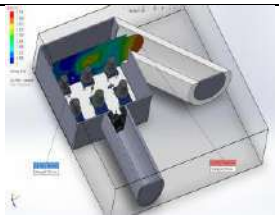
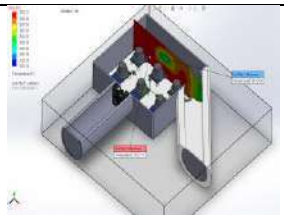
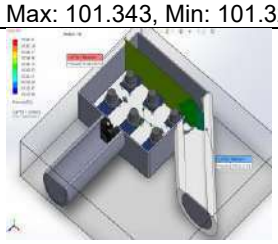
Zona	Velocidad [m/s]	Temperatura [°C]	Presión [kPa]
1	 Max: 5.334, Min: 0.229	 Max: 20.06, Min: 20.04	 Max: 101.344, Min: 101.324
2	 Max: 5.386, Min: 0.19	 Max: 20.06, Min: 20.04	 Max: 101.343, Min: 101.321
3	 Max: 4.876, Min: 0.323	 Max: 20.06, Min: 20.04	 Max: 101.344, Min: 101.332

Figura 10. Resultados de la simulación 1 para la familia de sensores MQ en la cámara de gases 1.

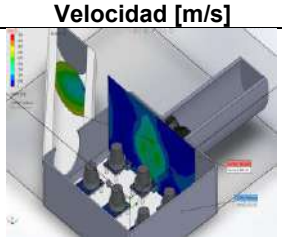
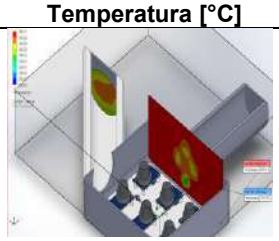
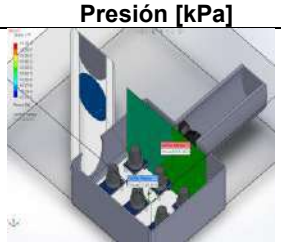
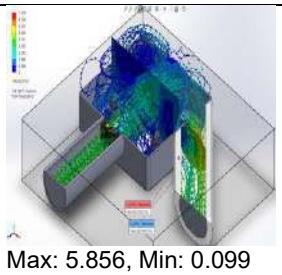
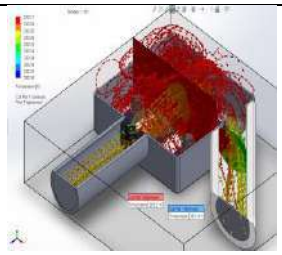
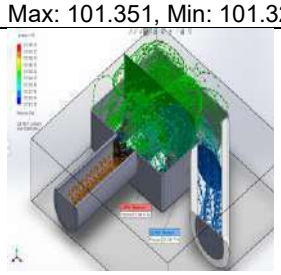
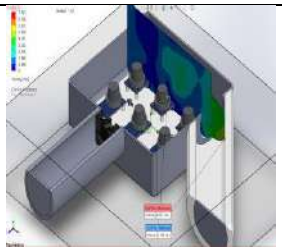
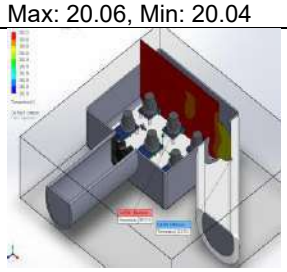
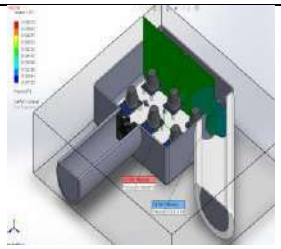
Zona	Velocidad [m/s]	Temperatura [°C]	Presión [kPa]
1	 Max: 5.464, Min: 0.079	 Max: 20.06, Min: 20.04	 Max: 101.351, Min: 101.324
2	 Max: 5.856, Min: 0.099	 Max: 20.06, Min: 20.04	 Max: 101.344, Min: 101.319
3	 Max: 4.621, Min: 0.182	 Max: 20.06, Min: 20.05	 Max: 101.346, Min: 101.328

Figura 11. Resultados de la simulación 2 para la familia de sensores MQ en la cámara de gas 2.

5. Conclusiones

La cámara de gases de una estación de monitoreo de la calidad del aire ambiental es una de las partes más importantes del sistema ya que es aquí donde los sensores tomarán una muestra de las variables. Dependiendo de las dimensiones, calidad de los sensores, distribución y flexibilidad en su disposición, así como de la forma en que la muestra haya entrado en la cámara, se obtendrán datos fiables o puede haber incertidumbre en la medida. Gracias a los resultados de las simulaciones, apreciamos el comportamiento del flujo de aire desde el punto de muestreo hasta el tubo de escape, apreciamos que para los sensores de la familia MQ el flujo presenta una mayor cantidad de recirculación en la cámara de gases en comparación con los sensores ZE12 y ZE03, siendo el sensor de la familia ZE12 el que presenta un mejor comportamiento de la trayectoria y velocidad del flujo a pesar de presentar un efecto vórtice entre el muestreo y la cámara. Un hecho relevante en el diseño de la cámara fue el redondeo de las esquinas que permitió una mejor trayectoria en las líneas de flujo y un comportamiento de menor velocidad, pero con mayor estabilidad para no afectar las mediciones de los sensores.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero recibido por el Instituto Politécnico Nacional y el CONAHCYT.

Referencias

[1] M. Marquès, E. Correig, D. Ibarretxe, E. Anoro, J. A. Arroyo, C. Jericó, M. R. Borrallo, M. Miret, S. Näf, A. Pardo, V. Perea, R. Pérez-Bernalte, R. Ramírez-Montesinos, M. Royuela, C. Soler, M. Urquizu-Padilla, A. Zamora, J. Pedro-Botet, L. Masana y L. J. Domingo, «Long-term exposure to PM10 above WHO guidelines exacerbates COVID-19 severity and mortality», Environment International, vol. 158, nº 106930, 2022.

[2] O. O. Flores Cortez, «Sistema telemático de monitoreo de calidad del aire en zonas remotas utilizando técnicas IoT y Big Data», Universidad Tecnológica de El Salvador, El Salvador, 2019.

[3] S. Yatkin, M. Gerboles, C. Belis, F. Karagulian, F. Lagler, M. Barbiere y A. Borowiak, «Representativeness of an air quality monitoring station for PM2.5 and source apportionment over a small urban domain», Atmospheric Pollution Research, vol. 11, nº 2, pp. 225-233, 2020.

[4] A. Cavaliere, F. Carotenuto, F. Di Gennaro, B. Gioli, G. Gualtieri, F. Martelli, A. Matese, P. Toscano, C. Vagnoli y A. Zaldei, «Development of Low-Cost Air Quality Stations for Next Generation Monitoring Networks: Calibration and Validation of PM2.5 and PM10 Sensors», Sensors, vol. 18, pp. 1-20, 2018.

[5] A. Dissanayaka, W. Taniya, B. De Silva, A. Senarathne, M. Wijesiri y K. Kahandawaarachchi, «Air Visio: Air Quality Monitoring and Analysis Based Predictive System», International Conference on Advancements in Computing, ICAC 2019, Malabe, 2019.

[6] L. Yang, S.X. Shao, C.E. Weng y Y.C. Yao, «The Development of UAV-based Air Quality Monitor System», de ACM International Conference Proceeding Series, 2020.

[7] P. Goyal, S. Gulia y S. Goyal, «Identification of air pollution hotspots in urban areas - An innovative approach using monitored concentrations data», Science of the Total Environment, vol. 798, nº 149143, 2021.

[8] L. García, A.J. Garcia-Sanchez y R. Asorey-Cacheda, «Smart Air Quality Monitoring IoT-Based Infrastructure for Industrial Environments», Sensors, vol. 22, nº 23, 2022.

[9] Tecnométrica, «Estación Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire TM-09», Tecnometrica - Monterrey, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.tecnometrica.com.mx/Estacion-Sistema-Monitoreo-Calidad-Aire.html. [Último acceso: 18 02 2023].

[10] qAIRa, «Ciudades Inteligentes: Smart-City», Grupo Qaira S.A.C, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.qairadrones.com/solucion/ambiental. [Último acceso: 18 02 2023].

[11] Breathe London., «Methodology», Environmental Defense Fund Europe, 2018. [En línea]. Disponible en: https://breathelondon.edf.org/methodology.html. [Último acceso: 18 02 2023].

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 29, pp. 375 – 386
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Los gemelos digitales, la tecnología innovadora de la Industria 4.0: Aplicaciones y educación en mecatrónica

Jiménez López Eusebio[1,2], Reyes Ávila Luis Alfonso [3], Martínez Molina Víctor Manuel[3], Sepúlveda Romo Adrián[1], Beltrán Márquez Yadira[1] y Luna Bracamontes Alberto[1]

[1,2] Universidad Tecnológica del Sur de Sonora-ULSA Noroeste, ejimenezl@msn.com
[1] Universidad Tecnológica del Sur de Sonora
[2] Universidad La Salle Noroeste
[3] IIMM

Resumen

La Industria 4.0 es un nuevo paradigma industrial que busca mejorar y optimizar los procesos y la maquinaria concebidos en la Manufactura 3.0. Para lograr sus objetivos, la Industria 4.0 utiliza diversas tecnologías disruptivas (Cómputo en la Nube, Internet de las cosas, Robótica Colaborativa, Simulación, etc.), los gemelos digitales y Sistemas Ciberfísicos. Un gemelo digital es una réplica de un activo físico (servicios, procesos, objeto y sistemas) y ambos están interrelacionados entre sí, comparten información bruta y evaluada, y se actualizan en tiempo real. La simulación computacional, la ingeniería mecánica y la mecatrónica son la base de los gemelos digitales. Las aplicaciones de los gemelos digitales se han extendido a campos como la agricultura, industria automotriz, medicina y aeronáutica, entre otras, y estos representan la tecnología innovadora de las Industria 4.0 y 5.0. En este artículo se exponen las generalidades de la tecnología de los gemelos digitales, se describen algunas de sus aplicaciones y se discuten algunos aspectos de estas tecnologías en la enseñanza de la mecatrónica.

Palabras clave: Industria 4.0, gemelos digitales, enseñanza de la mecatrónica.

1. Introducción

Una revolución industrial es una transformación de las prácticas industriales tradicionales en nuevas técnicas dominadas por las tecnologías disponibles en aquel momento [1]. Hoy en día, el mundo industrial está experimentando una nueva revolución industrial que está transformando de forma y fondo los procesos productivos de las empresas y que presiona a las universidades ha impulsar cambios en la educación en general. Esta nueva revolución industrial tiene la capacidad de modificar y transformar aquellas economías nacientes hacia un futuro prometedor ya que sus nuevas tecnologías pueden incrementar la productividad e impulsar la innovación en diversas empresas e industrias. De hecho, la innovación tecnológica que promueve la cuarta revolución industrial a través de la aplicación de una diversidad de tecnologías disruptivas, provocará cambios importantes en toda la sociedad [2]. La cuarta revolución industrial está representada por el término Industria 4.0 (I.40) y su centro tecnológico son los sistemas ciberfísicos. La visión de la I.40 propone que la conexión en tiempo real de los sistemas físicos y digitales, junto con las nuevas tecnologías facilitadoras, cambiarán la forma en que se realiza el trabajo y, en ese sentido, será posible cambiar los equilibrios tradicionales de las operaciones que existen entre las prioridades competitivas de los costos, la flexibilidad, la velocidad y la calidad [3].

La introducción de las tecnologías disruptivas y la digitalización a los procesos industriales han provocado una aceleración en la transición de la fábrica clásica, concebida bajo la filosofía de la Industria 3.0, a la fabricación inteligente que opera bajo los objetivos y la visión de la I4.0 [4]. Esta transición es conocida como Industria 3.5 y se presenta como una estrategia híbrida entre la actual Industria 3.0 y la futura I4.0 para la migración por fases a la fabricación inteligente y la producción ecológica con las

infraestructuras existentes [5], además, se centra en la gestión total de los recursos y en la transformación digital con el objetivo de mantener las ventajas competitivas de los recursos actuales que existen en las fábricas. Otro concepto que ha emergido en la actualidad es el de la Industria 5.0 o quinta revolución industrial (5IR), que viene a restaurar a los trabajadores a los centros de trabajo, ya que la I4.0 promueve la hiperconectividad y la hiperautomatización lo que implica un desplazamiento de los seres humanos de los centros de producción industrial. Cabe mencionar que, en abril de 2021, la Unión Europea presentó el plan 5IR en conjunto con los objetivos de desarrollo sostenible, que tiene como centro la orientación a las personas y una visión hacia una economía flexible, esto fue debido a que el desarrollo a 10 años de la I4.0 ya no presta atención a los principios originales de equidad social y la sostenibilidad [6].

Para alcanzar sus propósitos la I4.0 sienta su base en nueve pilares los cuales son [7]: 1) Robótica colaborativa, 2) Simulación, 3) Internet de las Cosas, 4) Cómputo en la nube, 5) Realidad Aumentada, 6) Ciberseguridad, 7) Integración horizontal y vertical de sistemas, 8) Manufactura Aditiva y 9) Big Data. Estas tecnologías se interaccionan entre sí mediante: 1) Conexiones Inherentes, 2) Conexiones de ciberseguridad y 3) Conexiones interpilares [8]. Estas relaciones no son fijas y pueden generarse otros conjuntos de conexiones, puesto que con el rápido ritmo de la innovación tecnológica se pueden plantear conexiones diferentes. Por otro lado, como ya se ha mencionado anteriormente, los sistemas ciberfísicos (CPS por sus siglas en inglés) representan la tecnología sobre la que se basa la I4.0. Los CPS se consideran sistemas multidimensionales y complejos que integran el cibermundo y el mundo físico dinámico. Esta integración se realiza con la colaboración de la informática, las comunicaciones y el control [9]. Cuando se habla de los CPS se hace referencia a los sistemas físicos de fabricación con procesadores, actuadores y sensores incorporados que pueden ser gestionados por una red de computadoras [10].

Una tecnología innovadora que se asocia con la I4.0 es el Gemelo Digital (DT por sus siglas en inglés) el cual se entiende como una copia virtual de un objeto o sistema físico que puede observarse, analizarse y controlarse en tiempo real [11]. La tecnología de los DTs está siendo utilizada en las empresas e industrias y su implementación está logrando una transformación positiva y agrandando diversas nuevas oportunidades para su desarrollo. Esta tecnología es capaz de proporcionar un control muy alto y efectivo sobre muchas entidades o activos físicos y su potencial se incrementa ya que pueden fungir como gestores de sistemas altamente complejos mediante el uso y la aplicación de diversos recursos tecnológicos de vanguardia. En general los DTs se caracterizan por tener integrado: 1) Activos físicos, 2) Estados digitales del sistema físico y 3) Un conjunto de datos que conectan a los activos físicos con los estados digitales. En este enfoque, un conjunto de sensores y las tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) se utilizan activamente para la transferencia de activos físicos al entorno digital, y la inteligencia artificial y las técnicas avanzadas de aprendizaje automático se emplean para aprender el comportamiento de la entidad física a partir del DT creado y para producir predicciones futuras [12]. Los DTs revolucionan las industrias puesto que reflejan casi todas las facetas de un producto, proceso o servicio y tienen el potencial de replicar todo lo que hay en el mundo físico en el espacio digital y proporcionan a los ingenieros información de retorno del mundo virtual [13]. Los DTs, junto con los sistemas ciberfísicos, representan las tecnologías de fondo de la I4.0 y serán la base para las futuras revoluciones industriales.

Por otro lado, la cuarta revolución industrial no solo ha traído cambios en los negocios y procesos productivos, también incide en la educación. Una parte importante de las tareas en la preparación para la I4.0, es la adaptación de la enseñanza superior a los requisitos de esta visión, en particular la enseñanza de la ingeniería [14]. La mecatrónica es un campo de la ingeniería vital para la I4.0 puesto que tiene un carácter integrador (proceso en el que se basa la propia I.4.0). La Mecatrónica fue concebida en la Industria 3.0 y, en consecuencia, junto con la computación, la informática y la robótica, aportó un importante impacto tecnológico al mundo industrial durante un periodo de al menos 50 años [15]. La enseñanza de la mecatrónica debe entonces alinearse a las exigencias de la I4.0 y promover una actualización de sus planes de estudios y métodos pedagógicos.

Debido a la importancia que tienen los DTs en el presente y futuro industrial, en este artículo se presenta un panorama general de esta tecnología y sus principales aplicaciones. Se describen algunas

experiencias de universidades que han desarrollado proyectos mecatrónicos para la enseñanza y el aprendizaje de los DTs.

2. Origen de los gemelos digitales

Una de las características fundamentales en la era de la cuarta revolución industrial es el proceso de digitalización que se está llevando a cabo en empresas e industrias. Al mismo tiempo que la transformación digital se está implementado en los procesos productivos, las empresas están buscando aquellos elementos diferenciadores en la diversa gama de tecnologías disponibles que las hagan más competitivas, tanto en posicionamiento como en aspectos económicos. Una de las tecnologías que está siendo considerada para establecer una diferenciación importante entre las empresas es el Gemelo Digital (DT) ya que este sistema tecnológico puede aplicarse a problemas o escenarios complejos, imprevistos e imprevisibles al combinar los mundos físico y digital en tiempo real [16]. Los DTs pueden ayudar a optimizar diversos procesos, a reducir los tiempos de fabricación y comercialización de los productos y a la implementación de programas de mantenimiento predictivo anticipando fallas y reduciendo los costos de producción, entre otras tareas importantes.

El origen del término “Gemelo Digital” es atribuido a Michael Grieves y a John Vickers, ambos trabajadores de la NASA y fue mencionado en una conferencia relacionada con el ciclo de vida del producto en el año 2003 [17]. En realidad, la dispositiva que mostraba el modelo del DT (ver Figura 1) se refería a la idea conceptual del Ciclo de Vida del Producto (PLM), pero mostraba los elementos básicos de un DT, esto es, un espacio físico o real, un espacio virtual y los enlaces de flujo de datos entre ellos. La idea básica detrás del modelo del DT (ver Figura 1) era que por cada sistema global existían dos subsistemas uno físico y otro virtual, este último integraba toda la información del físico lo cual implicaba que existía un hermanamiento entre subsistemas, es decir, entre la información del espacio real (activo físico) y la información del espacio virtual y viceversa. En un inicio el concepto de DT se definió como una representación virtual de un producto físico que contiene información sobre dicho producto, con origen en el ámbito de la gestión del producto. Posteriormente, Michael Grieves mejora su definición del DT definiéndolo como conjunto integrado por tres componentes: 1) Un producto físico, 2) Una representación virtual de ese producto y 3) Las conexiones de datos bidireccionales que transmiten datos de la representación física a la virtual.

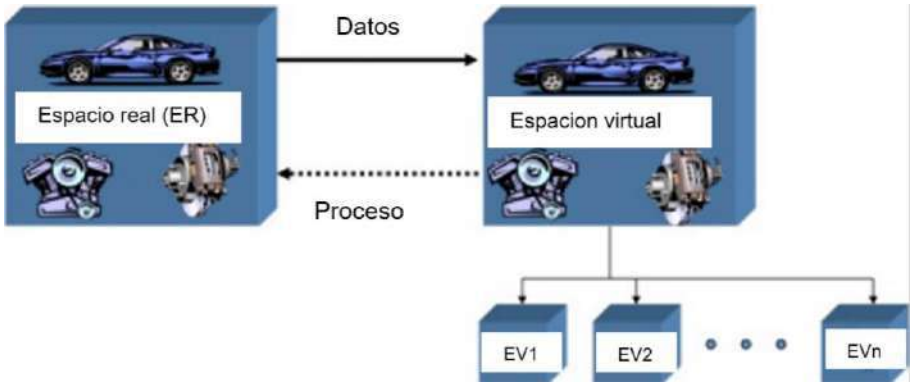


Figura 1. Descripción gráfica de un DT según Grieves [17]

Otros autores describen que el término “Gemelo Digital” fue acuñado en el año 2000 por investigadores de la NASA. Estos investigadores describen el DT como una representación virtual de un sistema o elemento del mundo real que incluye simulaciones y datos en tiempo real. Esta definición original sentó las bases para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de los gemelos digitales [18]. Un antecedente sobre la idea de los DT fue el proyecto Apollo 13 allá por los años 70, debido a que en ese proyecto se presentó por primera vez una imitación de las condiciones de la nave espacial lo que facilitó a los responsables en tierra dar solución a una diversidad de problemas en tiempo real.

El mapa de ruta de la evolución de los DTs se presenta en la Figura 2 y tiene como origen precisamente el proyecto del Apollo 13 [19].

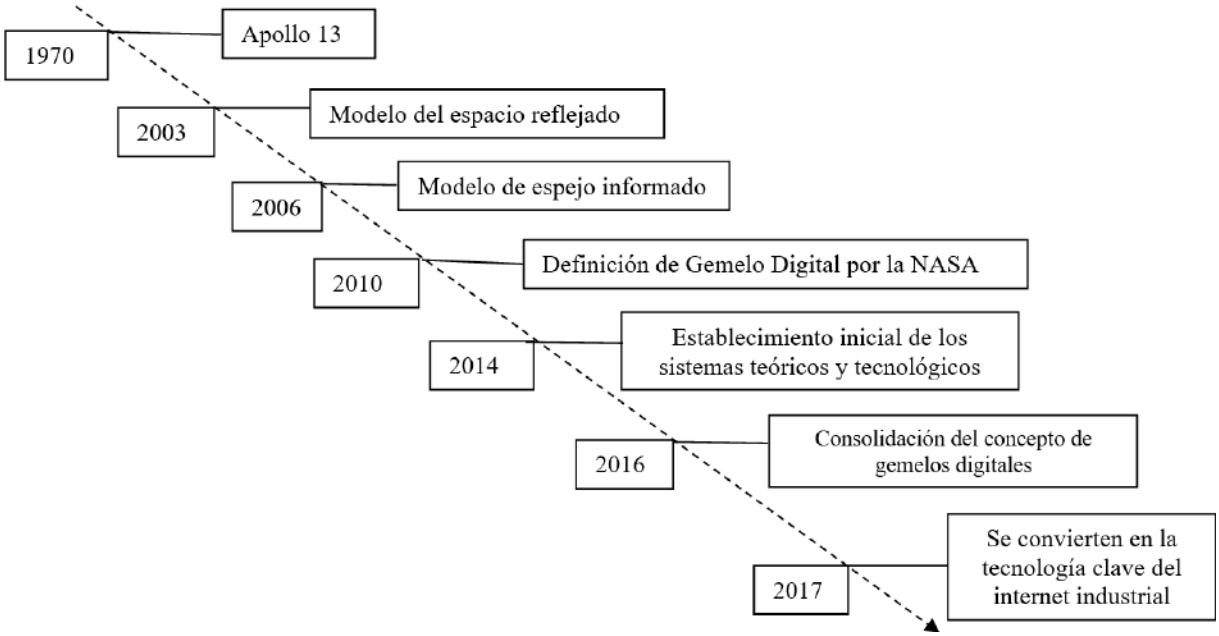


Figura 2. Hoja de ruta de la evolución de los DTs [19].

Hoy en día los DTs se han expandido a diversas áreas de aplicación, esto se debe a que los avances en computación han permitido que existan más opciones y proveedores para almacenar, procesar y transmitir datos, lo que ha permitido que los costos sean menores y accesibles. Además, otras tecnologías disruptivas como el cómputo en la nube, el Big Data, el Internet Industrial de las cosas y la Inteligencia Artificial, entre otras, permiten el diseño de los DTs y su expansión a diversas áreas de aplicación, como el transporte, la logística, el mantenimiento, la agricultura, la medicina y la manufactura. De hecho, se ha estimado que el para 2026 el mercado mundial de los DTs superará los 48.200 millones de dólares [20]. El aumento en la demanda de los DTs se notó en la medicina, principalmente en la industria sanitaria y farmacéutica, esto debido a la pandemia de COVID 19.

3. Características técnicas de los gemelos digitales

Los Gemelos Digitales pueden ser considerados como sistemas complejos, esto es, sistemas integrados por dos o más partes o componentes que se relacionan entre sí para generar varios resultados y objetivos que no podrían lograrse si las partes estuvieran separadas. De esta manera, el DT y la parte física que representa, no podrían generar resultados de alto valor si operan en forma separada. Una nueva definición de DT la proporcionan Grieves y Vickers [21]: *El gemelo digital es un conjunto de construcciones de información virtual que describe completamente un producto manufacturado físico potencial o real desde el nivel microatómico hasta el nivel macrogeométrico.* La definición de DT no es única y depende de las aplicaciones. La Tabla 1 muestra otras propuestas de definiciones descritas por otros autores y su correspondiente orientación.

Los DTs son considerados como modelos de tres dimensiones y cinco dimensiones. El modelo de Grieves y Vickers [21] es de tres dimensiones ya que considera solo un espacio real o físico, un espacio virtual y enlaces de flujo de datos entre ellos (ver Figura 1), mientras que el modelo de Tao et al. [26] es de cinco dimensiones (Espacio Físico, Espacio Virtual, Servicios, Conjunto de Datos, las Conexiones entre los elementos). La Figura 3 muestra el modelo en cinco dimensiones del DT. Este modelo proporciona una visión más amplia de la constitución interna de un DT.

Campos de investigación	Universidades/Institutos	Concepto Teórico.
Producción	Politecnico di Milano	"Una contraparte virtual e informatizada de un sistema físico que puede explotar una sincronización en tiempo real de los datos sensados procedentes del campo y está profundamente vinculada con la Industria 4.0" [22].
PLM	Polytechnic University of Madrid and AIRBUS Group	"Una contraparte digital equivalente al producto que existe a lo largo del ciclo de vida del producto, desde la concepción y el diseño hasta el uso y el servicio; esta entidad conoce los estados pasados, actuales y posibles futuros del producto, y facilita el desarrollo de servicios inteligentes relacionados con el producto" [23].
Diseño	University of Ottawa	"La capa cibernética de los Sistemas Ciberfísicos, que evoluciona de forma independiente y mantiene una estrecha integración con la capa física" [24].

Tabla 1. Resumen de las definiciones de DT por institución y campo de investigación [25]

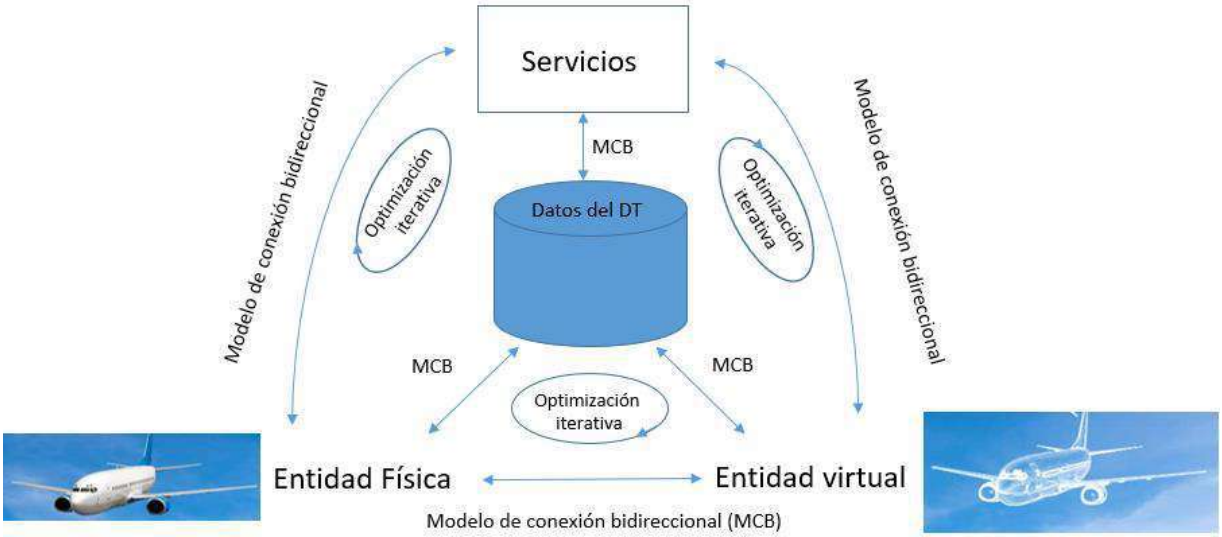


Figura 3. Modelo de cinco dimensiones de un DT [26].

Debido a la diversidad de definiciones de los DTs y a sus campos de aplicación, existen varias clasificaciones de estas tecnologías. De acuerdo con Pronost et al. [27], los DTs tienen cuatro subcategorías,: 1) Gemelo predigital (Es un modelo virtual sin modelo físico), 2) Modelo Digital (Es un modelo digital de un activo físico pero sin interacción), 3) Sombra Digital (Se compone de un objeto físico y un modelo virtual actualizado dinámicamente por los datos del objeto físico) y 4) Un gemelo digital (Se compone de un objeto físico y uno digital, que están equipados con dispositivos de red para garantizar una conexión sin fisuras y un intercambio continuo de datos).

A groso modo la operación de un DT se muestra en la Figura 4. El DT está compuesto por una Entidad o Activo Físico (AF), una Entidad Virtual (EV) integrada por modelos de AF y una relación bidireccional descritas por f y g. La expresión f:AF→EV describe la información (datos) del dominio AF que se transmite a la entidad EV, en tanto que la expresión g:AF→EV representa el envío de información procesada al activo físico (AF). El envío de datos y la información procesada es en tiempo real.

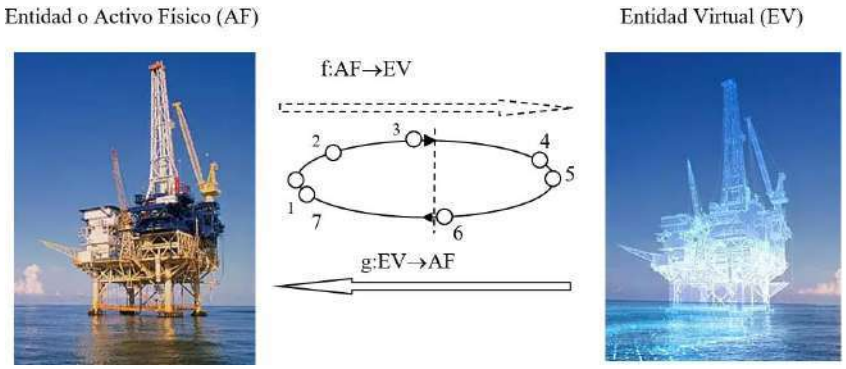


Figura 4. Flujo operativo de un DT. Idea mejorada de [28]

El ciclo operativo se explica de la siguiente manera: En el estado 1 el Activo Físico (AF) está operando e interactuando con su entono o medio ambiente. En el estado 2 elementos de señalización (sensores) captan y miden el comportamiento de AF. El estado 3 representa el envió de la información captada por los sensores a la Entidad Virtual (f:AF→EV). El estado 4 describe los datos en tiempo real de AF y sus históricos, así como información de otras fuentes. El estado 5 representa el procesamiento interno de los datos en modelos físicos o estadísticos (p.e. uso de la Inteligencia Artificial) y otorga la salida de los datos procesados. El estado 6 representa el envío de la información procesada de EV a AF (g:AF→EV). Finalmente, el estado 7 representa los comandos que recibirán la información de EV y que ejecutarán en AF. En todo el ciclo operativo se usan diversas tecnologías como sensores inteligentes, el internet de las cosas y cómputo en la nube, entre otras. Por otro lado, de acuerdo con da Silva et al. [29], una arquitectura jerárquica genérica asociada con un DT, consta de cinco capas: una capa física, una capa de datos, una capa de integración, una capa de servicios y una capa de decisiones. La Tabla 2 describe a groso modo cada una de las capas.

Capa	Descripción de la capa
Capa 4 (Decisiones)	Está basada en los servicios impulsados por el DT. Esta capa de decisión permite controlar el sistema físico teniendo en cuenta objetivos específicos. Los principales algoritmos de control pueden implementarse utilizando servicios del DT en esta capa.
Capa 3 (Servicios)	La integración proporcionada por Capa 2 se sincroniza con las capas de datos y la física. El DT puede proporcionar diferentes servicios mediante el procesamiento de datos, herramientas de modelado, razonamiento automático, Inteligencia Artificial y algoritmos de optimización. Los servicios impulsados por el DT son la supervisión, el diagnóstico y el pronóstico y el control en red, entre otros.
Capa 2 (Integración)	En esta capa se garantiza la integración de las capas intermedias y tiende un puente entre las capas física y virtual. Las tecnologías de red, como el IoT (Internet de las cosas), son relevantes para conectar eficientemente procesos y sistemas. En esta capa se conecta el sistema CPS por lo que se tiene que tener en cuenta los problemas de ciberseguridad.
Capa 1 (Datos)	El flujo de datos entre los activos físicos y las entidades virtuales es continuo en ambas direcciones. La gran cantidad de datos generada en esta capa debe traducirse para tener información valiosa y significativa. Para ello, se puede usar Big Data y computación granular. El aprendizaje automático y la Inteligencia Artificial también pueden permitir la toma de decisiones y el análisis de datos en esta capa.
Capa 0 (Física)	En esta capa se localizan máquinas, sensores, dispositivos, robots, equipos de bombeo, bandas, actuadores. Los datos de operación se adquieren y conservan en la Capa 1.

Tabla 2. Arquitectura que soporta a un DT. Adaptada de [29].

3.1 Relaciones entre los gemelos digitales y la simulación

La simulación es una herramienta que constituye uno de los nueve pilares de la Industria 4.0 [7] y se refiere a la imitación del comportamiento de un sistema. De acuerdo con Boschert y Rosen [30], los DTs representan la cuarta ola de la tecnología de la simulación. En la década de los años 60 la simulación se limitaba a los expertos (aplicación individual). Una década y media después la simulación

tuvo su segunda ola y se refería a la disponibilidad de las herramientas de simulación (en esta ola la simulación ya era una herramienta estándar). En el año 2000 se dio la tercera ola de la simulación y se refería a la existencia de métodos de diseño de sistemas basado en la simulación. En esta ola, la simulación evoluciona y permite un enfoque más amplio del tipo multinivel, disciplinario y sistémico lo que implicó mayores y diversas aplicaciones. La cuarta ola se inicia en el año 2015 con la aparición de los DTs. En esta ola las simulaciones son esenciales en la funcionalidad de los sistemas ya que ofrecen asistencia sin interrupciones al largo del ciclo de vida del producto.

Las técnicas de simulación dan vida a los DTs y en su interior sus subsistemas son capaces de comunicarse entre sí en el mundo virtual. La simulación es una de las tecnologías clave que se encuentran en el centro del desarrollo de los DTs, ya que proporciona una mayor visibilidad del rendimiento futuro y la capacidad de identificar las decisiones óptimas para obtener beneficios [31]. Los DTs integran toda la información, datos y modelos descriptivos y ejecutables para la gestión de su gemelo real planificado, contando con la simulación como tecnología central. La relación entre el DT y la simulación puede interpretarse de dos maneras: 1) El DT es un modelo para presentar el sistema basado en varios tipos de técnicas y herramientas de simulación y 2) el DT es una simulación del propio sistema [32].

3.2 Algunas aplicaciones de los Gemelos Digitales

Los DTs son tecnologías que proporcionan ventajas competitivas a las empresas. Al ser tecnologías diferenciadoras, los DTs se aplican en campos industriales, como la aeronáutica y automotriz, en la construcción, minería y salud, en la Industria manufacturera en general, en la Agricultura y Acuacultura, en la Educación y en el reacondicionamiento tecnológico (Retrofitting), entre otras [33]. La Figura 5 muestra algunas aplicaciones de los DTs.

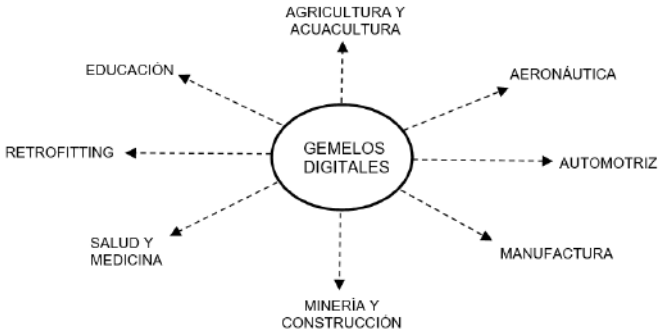


Figura 5. Aplicaciones de los DT, tomado y mejorado de [33]

4. Educación en Mecatrónica

La Mecatrónica, de acuerdo con Guérineau et al. [34], es una evolución de los sistemas electromecánicos y de los sistemas ciberfísicos procedentes de una evolución de los cibersistemas o de la informática y el desarrollo de software. La Ingeniería Mecatrónica es y será un campo de apoyo importante para la Industria 4.0, pues es la base del diseño de los distintos activos físicos como robots, máquinas y líneas de producción, entre otros productos. Una característica que es común entre la Mecatrónica y la Industria 4.0, es la sinergia. Por consiguiente, la integración de las tecnologías disruptivas y de fondo, como los Sistemas Ciberfísicos y los DTs en el desarrollo y operación de sistemas productivos, serán las nuevas tareas del ingeniero mecatrónico. Jiménez et al. [35] propusieron una serie de consideraciones técnicas para desarrollar competencias específicas en los Ingenieros Mecatrónicos en el contexto de la Industria 4.0 y 5.0, algunas de estas competencias se mencionan a continuación: Diseño de CPS, Funcionamiento de CPS, Diseño de DTs, Mantenimiento de CPS, Conversión y reacondicionamiento de CPS, Automatización de sistemas inteligentes de producción, Diseño, fabricación y producción digitalizada, Operación de robots colaborativos, Gestión de la

ciberseguridad en los CPS, Integración de tecnologías en fábricas inteligentes, Optimización de procesos industriales, Diseño de sistemas inteligentes de producción, Diseño de sistemas hombre-máquina, Análisis de grandes bases de datos y Simulación interdisciplinar en sistemas inteligentes de producción.

Por su importancia en la industria los DTs (que son evoluciones de la simulación, electromecánica y mecatrónica) han despertado un importante interés en la Educación en Ingeniería, en especial en la Educación en la Mecatrónica. Existen diversas experiencias en la literatura que describen proyectos académicos y de investigación sobre los DTs desarrollados por la Ingeniería Mecatrónica, algunos de ellos se resumen a continuación: Guc, Viola y Quan [36], describen el uso de la simulación y de un DT para mejorar los aprendizajes en Mecatrónica y Control en los laboratorios de la Universidad de California, Merced. La utilización del concepto del DT en la enseñanza a distancia en el laboratorio tuvo una gran influencia en el progreso educativo de los alumnos. En la Universidad Técnica de Berlín se desarrolló un reto en donde los estudiantes de diferentes disciplinas de ingeniería tenían la tarea de desarrollar prototipos virtuales y físicos para un sistema de producto sostenible y complejo con un gemelo digital y los respectivos modelos de negocio sostenibles. De acuerdo a una encuesta realizada a los alumnos después del reto, estos comentaron que la retroalimentación y el análisis más profundo mostraron que se cumplieron los objetivos generales de aprendizaje: pensamiento de diseño, desarrollo del DT e ingeniería sostenible, así como colaboración interdisciplinar [37]. Finalmente, Nezzi et al. [38], crearon un demostrador sobre una simulación 3D en aplicaciones basadas en un DT para la fabricación. La idea fue la demostración de la eficacia y el potencial de la implementación de un DT basado en la recogida de datos en tiempo real y la simulación 3D con un sistema de transferencia mecatrónica inteligente.

La enseñanza de los gemelos digitales requiere del dominio de varios campos del conocimiento y sobre todo de los recursos tecnológicos con los que cuenta el centro de estudio. Por ejemplo, existe tecnología como el NX MCD (con la cual es posible implementar una puesta en servicio virtual de un modelo funcional) que forma parte de las herramientas PLM de Siemens. Este sistema puede hacer validaciones y los alumnos pueden añadir datos al modelo funcional, tales como articulaciones, movimiento, sensores, actuadores, comportamiento ante colisiones y otras propiedades cinemáticas y dinámicas de cada componente [39]. De esta manera se puede plantear un proyecto en donde los estudiantes investiguen y examinen aquellas herramientas de software asociadas con los gemelos digitales. Liljaniemi y Paavilainen [39] describen como un grupo de alumnos usaron esta herramienta para desarrollar un proyecto relacionado con la simulación de un robot paralelo delta que funge como gemelo digital de un robot físico (Ver Figura 6).

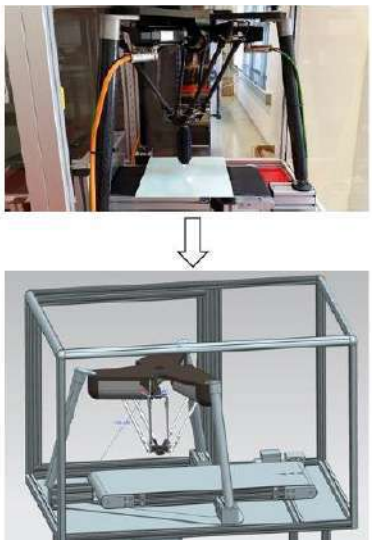


Figura 6. Robot Delta en el laboratorio de mecatrónica y modelo 3D [39]

El proyecto se desarrolló en cuatro partes: diseño de un modelo 3D de un equipo mecatrónico, conversión del modelo 3D en un gemelo digital con NX Mechatronics Concept Designer, diseño de un programa PLC (Programmable Logic Controller) para el equipo y enlace del PLC con un gemelo digital a través de OPC (Open Platform Communications). Este proyecto se desarrolló usando herramientas computacionales que facilitan la construcción del gemelo digital y su conexión con el sistema real.

En aquellos casos en donde no se cuenta con tecnología para desarrollar en una sola plataforma el DT, primero se desarrolla el prototipo físico y posteriormente se diseña el gemelo digital en alguna plataforma computacional definiendo el alcance de la simulación y finalmente se diseñan las relaciones bi-direccionales. Por ejemplo, Nikolaev et al. [40] presenta un estudio sobre el desarrollo de un vehículo aéreo no tripulado realizado por estudiantes de maestría. El sentido del proyecto se basó en el proceso real de desarrollo de productos. Los alumnos usaron herramientas de simulación y optimización tales como: 1) NX CAD, 2) Simcenter 3D, 3) LMS System Synthesis, 4) LMS Amesim, 5) ANSYS y 6) STAR-CCM) para crear un gemelo digital de un producto real y lograr la continuidad y la transparencia del proceso de desarrollo. El sistema de gestión del ciclo de vida del producto (PLM) fue utilizado para gestionar los requisitos y los cambios, así como para integrar todos los resultados de la simulación. La idea central de este proyecto fue construir un gemelo digital para validar el ciclo de vida del producto. La Figura 7 muestra Diagrama en V y fases de desarrollo del producto basado en sistemas.

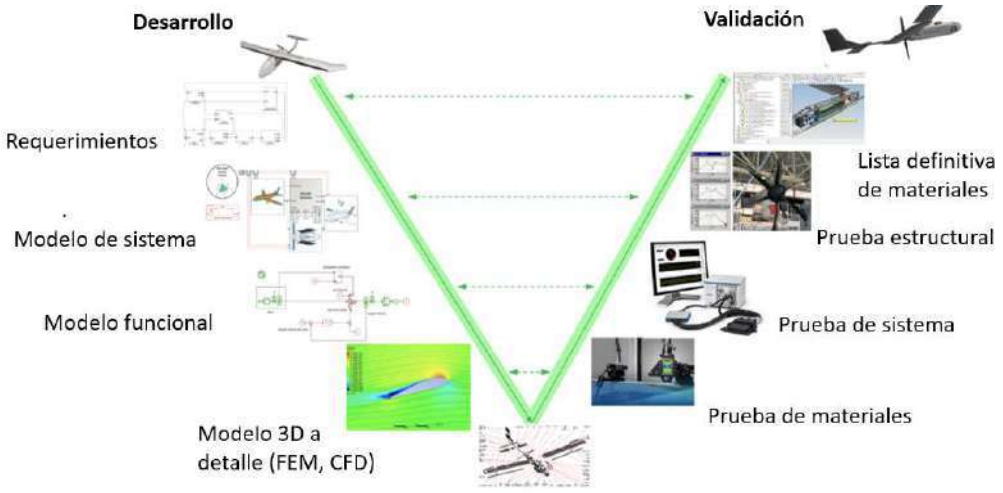


Figura 7. Diagrama en V y fases de desarrollo del producto basado en sistemas para la guía del desarrollo del Gemelo Digital [40]

5. Conclusiones

En este artículo se ha presentado un panorama acerca de los DTs y algunas de sus definiciones. Las principales conclusiones se resumen en los puntos siguientes:

- Los DTs son tecnologías diferenciadoras entre las empresas que luchan día a día por ser más competitivas y que tratan de mejorar sus rendimientos económicos. Por consiguiente, el diseño, la configuración y operación de este tipo de tecnologías deberán ser tareas de los Ingenieros Mecatrónicos, puesto que, en primer lugar, el ciclo de operación de un DT implica la generación y el envío de señales, la simulación y el reenvió de información procesada a los activos físicos y, segundo lugar, porque para el desarrollo de muchos activos físicos se requiere de la integración de la Mecánica, la Computación y la Electrónica.
- El conocimiento teórico-técnico de los DTs es fundamental para poder comprender su configuración y las características de cada una de sus capas y sus interrelaciones internas y externas. La selección correcta de una definición de DT está asociada con el campo de aplicación y con el modelo teórico o metodología que será aplicada para su desarrollo u operación.

- La simulación computacional es una herramienta esencial en el desarrollo y la operación de los DTs y en general para la implementación de la Industria 4.0. Por lo tanto, esta tecnología deberá ser promovida y enseñada en los programas de estudio de la Ingeniería Mecatrónica.
- La enseñanza de los DT en la ingeniería depende de los recursos tecnológicos con los que cuente la universidad y sus laboratorios, y de la dimensionalidad de los proyectos didácticos que se requieran desarrollar.
- El uso de los DTs en la enseñanza de la Mecatrónica puede motivar a los alumnos a desarrollar competencias integradoras y sobre todo a participar en proyectos más complejos.

La Ingeniería Mecatrónica debe impulsar el estudio de los Gemelos Digitales y los Sistemas Ciberfísicos, ya que ambas tecnologías son y serán la base fundamental para la actual y las futuras revoluciones industriales.

Referencias

[1] Raja, S.A., Muthuswamy, P. (Industry 5.0 or industry 4.0S? Introduction to industry 4.0 and a peek into the prospective industry 5.0 technologies. Int J Interact Des Manuf, 17, pp. 947–979, 2023.
[2] Nyagadza, B., Pashapa, R., Chare, A., Mazuruse G., Hove P.K. (2022) Digital technologies, Fourth Industrial Revolution (4IR) & Global Value Chains (GVCs) nexus with emerging economies' future industrial innovation dynamics, Cogent Economics & Finance, 10:1, 2014654, 2022, DOI: 10.1080/23322039.2021.2014654.
[3] Olsen, T.L., Tomlin, B. Industry 4.0: Opportunities and Challenges for Operations Management, Manufacturing & Service Operations Management, 22, 1, pp. 113-1122, 2020.
[4] Ryalat, M., ElMoaqet, H., AlFaouri, M. Design of a Smart Factory Based on Cyber-Physical Systems and Internet of Things towards Industry 4.0. Appl. Sci.,13, 2156, 2023. https://doi.org/10.3390/ app13042156
[5] Tzu-Yen Hong & Chen-Fu Chien (2020) A simulation-based dynamic scheduling and dispatching system with multi-criteria performance evaluation for Industry 3.5 and an empirical study for sustainable TFT-LCD array manufacturing, International Journal of Production Research, 58:24, 7531-7547, DOI: 10.1080/00207543.2020.1777342
[6] Zhihan, Lv. Digital Twins in Industry 5.0, Research, 6, pp. 1-16, 2023
[7] Hernandez G.M., Habib L., Garcia F.A., Montemayor, F. Industry 4.0 and Engineering Education: An Analysis of Nine Technological Pillars Inclusion in Higher Educational Curriculum. In Best Practices in Manufacturing Processes, 1st ed.; García, J., Rivera, L., González, R., Leal, G., Chong, M., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, pp. 525–543, 2019.
[8] Melnik, S., Magnotti, M., Butts, C., Putman, C., Aqlan, F. A. Concept Relationship Map for Industry 4.0. In Proceedings of the 5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Detroit, MI, USA, 10–14 August 2020.
[9] Liu, Y., Peng, Y., Wang, B., Yao, S., Liu, Z. Review on cyber–physical systems. IEEE/ CAA J Autom Sin, 4,1, pp. 27–40. 2017.
[10] Gunes, V., Peter, S., Givargis, T., & Vahid, F. A survey on concepts, applications, and challenges in cyber-physical systems. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 8,12, 4242–4268, 2014.
[11] Menon, D., Anand, B., Chowdhary, C. L. Digital Twin: Exploring the Intersection of Virtual and Physical Worlds, IEEE ACCES, 2023. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3294985.
[12] Erol, T., Mendi, A. F., Dogan, D. Digital Transformation Revolution with Digital Twin Technology. 2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT). 2020, doi:10.1109/ismsit50672.2020.925
[13] Fu, Y., Zhu, G., Zhu, M. et al., Digital twin for integration of design-manufacturingmaintenance: An overview, Chin. J. Mech. Eng. 35, 80, 2022. http://dx.doi.org/ 10.1186/s10033-022-00760-x, 2022.
[14] Coşkun, S., Kayıkcı, Y., Gençay, E. Adapting Engineering Education to Industry 4.0 Vision. Technologies, 7,1:10, 2019. https://doi.org/10.3390/technologies7010010.

[15] Jimenez, E., Ochoa, F.J., Luna, G., Muñoz, F., Cuenca, F., Maciel, M.A. Competency-based Education of the Mechatronics Engineer in the Transition from Manufacturing 3.0 to Industry 4.0. In Proceedings of the 2nd IFSA Winter Conference on Automation, Robotics & Communications for Industry 4.0 (ARCI' 2022), Andorra la Vella, Andorra, 2–3 February 2022; pp. 84–87, 2022.
[16] Parrott, A.; Warshaw, L. Industry 4.0 and the Digital Twin: Manufacturing Meets its Match; Deloitte University Press: New York, NY, USA, pp. 1–17. 2017.
[17] Grieves, M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication (2014). Google Scholar. 2014.
[18] Negri, Elisa, Luca Fumagalli, and Marco Macchi. "A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems." Procedia manufacturing 11 (2017): 939-948.
[19] D. Menon, B. Anand and C. L. Chowdhary, "Digital Twin: Exploring the Intersection of Virtual and Physical Worlds," in IEEE Access, vol. 11, pp. 75152-75172, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3294985.
[20] Research and Markets. "$48.2 billion digital twin markets: aerospace & defense, automotive & transportation, healthcare—Global forecast to 2026." Yahoo Finance. https://www.prnewswire.com/news-releases/digital-twin-market-worth-48-2-billion-by-2026--exclusive-report-by-marketsandmarkets-301129921.html (accessed July.28, 2023).
[21] Grieves, M., Vickers, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen, J., Flumerfelt, S., Alves, A. (eds) Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Springer, Cham. 2017 https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.
[22] Negri, E., Fumagalli, L., Macchi M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems, Procedia Manufacturing,11, pp. 939-948, 2017.
[23] Ríos, J., Hernández, J.C., Oliva, M., Mas F. Product avatar as digital counterpart of a physical individual product: literature review and implications in an aircraft, in: International Conference on Concurrent Engineering, pp. 657-666, 2015.
[24] Alam, K.M., A., Saddik, E. C2PS: a digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems, IEEE Access 5 (2017) 2050-2062. 2017.
[25] Tao, F., Zhang, M., Nee, A.Y.C. Background and Concept of Digital Twin, Chapter 1. In Digital Twin Driven Smart Manufacturing. Academic Press, London U.K. 2019.
[26] Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., Nee A.Y.C. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment, CIRP Ann. Manuf. Technol. 67, 1, pp.169-172. 2018.
[27] Pronost, G., Mayer, F., Marche, B., Camargo, M., Dupont, L. Towards a Framework for the Classification of Digital Twins and their Applications. 2021 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), Jun 2021, Cardiff, France, pp.1-7, 2021.
[28] Newrzella, S.R., Franklin, D. W., Haider, S. 5-Dimension Cross-Industry Digital Twin Applications Model and Analysis of Digital Twin Classification Terms and Models," in IEEE Access, 9, pp. 131306-131321, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3115055.
[29] da Silva, R., de Oliveira, S., de Bessa, I.V., de Carvalho, F.A., Jr., de Medeiros, R.L.P., de Lucena, V.F. Digital Twin Applications: A Survey of Recent Advances and Challenges. Processes, 10, 744. 2022. https://doi.org/10.3390/pr10040744
[30] Boschert, S., Rosen, R. (2016). Digital Twin—The Simulation Aspect. In: Hehenberger, P., Bradley, D. (eds) Mechatronic Futures. Springer, Cham. pp. 59-74. 2016.
[31] Biller,B., Jiang, X., Yi, J., Venditti, P., Biller, S. Simulation: the Critical Technology in Digital Twin Development, *2022 Winter Simulation Conference (WSC)*, Singapore, pp. 1340-1355, 2022.
[32] Phanden, R.K., Sharma, P., Dubey, A. A review on simulation in digital twin for aerospace, manufacturing and robotics, Materials Today: Proceedings, 2020.
[33] Attaran, M., Celik, G. Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities, Decision Analytics Journal,6, 2023,100165, https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165.
[34] Guérineau, B., Bricogne, M., Durupt, A., Rivest, L. Mechatronics vs. cyber physical systems: Towards a conceptual framework for a suitable design methodology. In Proceedings of the 2016 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS)/17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM), Compiegne, France, 15–17 June 2016; pp. 314–320. 2016.

[35] Jimenez, E., Cuenca, F., Luna, G., Ochoa, F.J. Maciel, M.A., Muñoz, F., Limon, P.A. Technical Considerations for the Conformation of Specific Competences in Mechatronic Engineers in the Context of Industry 4.0 and 5.0. Processes, 10, 1445. 2022

[36] Guc, F., Viola J., Quan Y. Digital Twins Enabled Remote Laboratory Learning Experience for Mechatronics Education, 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI), Beijing, China, 2021, pp. 242-245, 2021.

[37] Hagedorn, L., Riedelsheimer, T., Stark, R. Project-Based Learning in Engineering Education – Developing Digital Twins in a Case Study, in Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED23), Bordeaux, France, 24-28 July 2023, pp. 2975-2984. 2023.

[38] Nezzi, C., De Marchi, M., Aruväli, T., Renato, V., Rauch, E. Implementation of 3D Simulation to Foster Digital Twin Based Applications in Manufacturing: An Educational Case Study (June 5, 2023). Proceedings of the 13th Conference on Learning Factories (CLF 2023), 2023. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4469934

[39] Liljaniemi A., Paavilainen H. Using Digital Twin Technology in Engineering Education – Course Concept to Explore Benefits and Barriers, Open Eng., pp.10:377–385. 2020.

[40] Nikolaev S., Gusev M., Padalitsa D., Mozhenkov E., Mishin S., Uzhinsky I. Implementation of “Digital Twin” Concept for Modern Project-Based Engineering Education. In: Chiabert, P., Bouras, A., Noël, F., Ríos, J. (eds) Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0. PLM 2018. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 540. Springer, Cham. 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01614-2_18

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 30, pp. 387 – 396
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Educación en Ingeniería 4.0 y la mecatrónica

Jiménez López Eusebio[1,2], García Velásquez Luis Andrés [1], Amavizca Valdez Laura Olivia[2], Dui Yin Wong Pacheco[2], Valdez Tribolet Socorro [2] y María del Rosario Mafara Duarte[2]

[1,2] Universidad La Salle Noroeste- UTS, ejimenezl@msn.com
[2] Universidad Tecnológica del Sur de Sonora (UTS)

Resumen

Hoy en día la educación está en un proceso de orientación y adaptación hacia la Industria 4.0 que exige nuevas competencias y habilidades en los técnicos e ingenieros para hacerle frente a los retos y desafíos que impone la cuarta revolución industrial. La Educación 4.0 nació como una respuesta a las necesidades de la Industria 4.0 que busca que el ser humano y la tecnología se alineen para permitir nuevas posibilidades. La Educación en Ingeniería 4.0 se refiere a la formación en ingeniería que genera el capital humano para la Industria 4.0 y busca que los estudios en ingeniería se transformen para satisfacer las demandas de la Industria 4.0, la cual hace hincapié en la integración de todas las disciplinas de la ingeniería y en el uso de las tecnologías disruptivas en la enseñanza. En este sentido, el papel del ingeniero mecatrónico en la Industria 4.0 es muy importante, por lo que es importante diseñar estrategias para su formación. En este artículo se presentan algunas consideraciones sobre las revoluciones industriales y educativas, y se discute el papel que juegan las tecnologías disruptivas en los procesos de cambio. Se describen algunos aspectos sobre la Educación en Ingeniería 4.0 y sobre el nuevo papel del ingeniero mecatrónico en la era de la cuarta revolución industrial.

Palabras clave: Industria 4.0, Educación 4.0, Mecatrónica.

1. Introducción

En la actualidad el mundo industrial se encuentra en un proceso de transformación a gran escala similar a las características de una revolución industrial. Las empresas están migrando hacia la hiperautomatización de los procesos y sistemas productivos lo que está implicando una reducción de la colaboración y la participación de las personas en las industrias. Todos estos cambios se deben principalmente a la introducción de las tecnologías disruptivas a los sistemas de producción y están provocando cambios de fondo y forma en la fabricación, los negocios, las organizaciones y en administración. Además, estas tecnologías tienen el potencial y la capacidad de innovar y provocar cambios significativos en las cadenas de valor de las industrias lo que eleva la visión y la confianza empresarial hacia el desarrollo de nuevos negocios, mejora la distribución de bienes y servicios, generan una mejor rentabilidad y un incremento del potencial para crecer y desarrollarse. Este cambio industrial disruptivo se le conoce como “Industria 4.0” o Cuarta Revolución Industrial (4 RI), y representa la era de la transformación digital y la digitalización de los ecosistemas industriales a escala mundial [1].

El concepto de Industria 4.0 aparece en Alemania y en el año 2011 el gobierno anuncia que la Industria 4.0 será una de sus iniciativas clave y estratégicas en materia de alta tecnología [2]. A partir de esa fecha, el concepto de Industria 4.0 fue y es ahora tratado con rigor por diversos académicos, investigadores, empresas y gobiernos de todo el mundo buscando conocer sus implicaciones reales en los procesos productivos, industrias, empresas, negocios, organizaciones, sociedad en general, en la educación y la salud, entre otros campos de aplicación. La Industria 4.0 es entonces la consecuencia de la aplicación de diversas y modernas tecnologías disruptivas en los procesos productivos. Bongomin et al. [3] cuantificaron 35 tecnologías disruptivas y 13 tecnologías clave actuales las cuales son: Internet

de las cosas, Big Data, impresión 3D, computación en la nube, robots autónomos, realidad virtual y aumentada, sistema ciberfísico, inteligencia artificial, sensores inteligentes, simulación, nanotecnología, drones y biotecnología.

La Industria 4.0 no solo está revolucionado los sistemas industriales, sino que también está provocando una nueva revolución educativa que implica cambios en la parte social, cultural, comunicación y en los valores éticos y morales de las sociedades de todo el mundo. La principal misión de este paradigma educativo es responder y hacerle frente a los retos y desafíos de la cuarta revolución industrial. La Educación 4.0 es quien responde a la Industria 4.0 y pretende, entre otras cosas, mejorar las competencias tecnológicas digitales en todos los niveles y potenciar el uso de las tecnologías digitales para la enseñanza y el aprendizaje [4].

Otro modo de concebir el concepto de la Educación 4.0 es: Se concibe a la Educación 4.0 como la aplicación sistemática de las tecnologías disruptivas modernas a los procesos de la enseñanza y el aprendizaje. Para alcanzar sus objetivos, la Industria 4.0 exige la conformación de nuevas competencias y mejorar las ya existentes, por lo que uno de los objetivos de la Educación 4.0 es satisfacer precisamente esas demandas. De acuerdo con Akturk et al. [5] la Educación 4.0 fue desarrollada a principios del siglo XXI y está centrada en la innovación y la producción. Este paradigma educativo ha combinado la epistemología del mundo virtual y real para resolver problemas en la educación. Para estos autores, la Educación 4.0 incluye aplicaciones en la educación como los macrodatos, la codificación robótica, la realidad aumentada/virtual, la inteligencia artificial, la nanotecnología, la computación en la nube, el internet de las cosas y la era digital; todas estas aplicaciones afectan la vida cotidiana de los seres humanos y los procesos formativos en las universidades. En términos generales la Educación 4.0 se basa en cuatro pilares: 1) Tecnologías, 2) Procesos, 3) Métodos didácticos y 4) Competencias [6].

Por otro lado, la Educación en Ingeniería es un campo de estudio que también está cambiando por la influencia de las tecnologías disruptivas en la formación de los ingenieros y por la demanda de nuevas habilidades y competencias de la Industria 4.0. Los nuevos roles que jugarán los ingenieros en la era digital serán interfuncionales, es decir, roles que realizarán los ingenieros que tienen la misma jerarquía y que se reúnen para llevar a cabo una actividad, pero son de diferentes áreas de trabajo. Cada rol de actividades requerirá distintos conocimientos y habilidades, principalmente conocimientos de la producción y computación. Para ser competitivos en la Industria 4.0 los egresados de las ingenierías de las universidades deberán construir una mentalidad de aprendizaje constante con la cual les sea posible adaptarse a los rápidos cambios e innovaciones tecnológicas que se van presentando en el ámbito industrial [7].

Una rama que se deriva de la Educación 4.0 es la Educación en Ingeniería 4.0 y se orienta a la formación de los ingenieros que demanda la cuarta revolución industrial [8]. La Educación en Ingeniería 4.0 es un tema nuevo que implica solventar diversos obstáculos, entre ellos conocer si con el conocimiento de un solo campo disciplinario es suficiente para estar preparado para los retos y desafíos que presenta la cuarta revolución industrial.

La Educación en Ingeniería 4.0 deberá sentar las bases necesarias para formar al nuevo Ingeniero 4.0. Para el caso de la formación del Ingeniero mecatrónico es necesario analizar cuáles serían los cambios que deben hacerse para alinearla a la Industria 4.0. La Ingeniería mecatrónica se ha convertido en un campo esencial para la implementación de la cuarta revolución industrial y es necesario implementar nuevos métodos de enseñanza y aprendizaje, introducir tecnologías disruptivas en el proceso de enseñanza, mejorar los laboratorios, transformar los planes de estudio y diseñar nuevas competencias, entre otras mejoras e innovaciones.

En este artículo se presenta un panorama general de las revoluciones industriales y educativas, enfatizando la importancia de las tecnologías disruptivas en los procesos productivos y en la educación en ingeniería. Se describen algunas consideraciones sobre la Ingeniería mecatrónica y su educación, así como el papel que deben jugar los ingenieros mecatrónicos en la cuarta revolución industrial.

2. Aspectos generales de las revoluciones industriales

En esta sección se presentan algunos aspectos generales sobre las revoluciones industriales pasadas, la actual y las futuras, decir, desde la primera revolución industrial caracterizada por la mecanización hasta la futurística Industria 6.0.

En general, el ser humano concibe una revolución industrial como un hecho único o aislado, sin embargo, en la realidad los paradigmas industriales, en una época determinada, provocan cambios e innovaciones que impulsan a las empresas, mejoran las economías mundiales y provocan transformaciones sociales. Una revolución tiene algunas características fundamentales: 1) Se deben dar en un tiempo relativamente corto, 2) Debe ser capaz de transformar de forma y fondo una gama de estructuras tales como: la económica, política, educativa, social y cultural y 3) Debe implicar un punto de no retorno a la anterior revolución [9]. Cuando se trata de cambios relacionados con la tecnología entonces se está ante la presencia de una revolución industrial. De acuerdo con Lambrechts et al. [10], los cambios que provocan los paradigmas industriales tiene la característica de ser progresivos o, dicho de otro modo, son modernizaciones de las anteriores. De esta manera la Industria 2.0 es una actualización tecnológica de la Industria 1.0 mientras que la Industria 4.0 es una modernización de las tres revoluciones anteriores. Cabe mencionar que una característica común de las revoluciones industriales es que no son simples cambios evolutivos industriales. Una condición que debe presentarse antes de que surja una revolución industrial es la acumulación de un volumen suficiente de tecnologías industriales completamente nuevas [11].

Si bien una revolución industrial viene acompañada de un conjunto de tecnologías, en general siempre se destaca una o varias de ellas. De esta manera, la Industria 1.0 se caracterizó por tener de corazón tecnológico a la máquina de vapor y la mecanización, la Industria 2.0 tuvo como eje tecnológico a la electricidad y la producción en masa, la Industria 3.0 tuvo como centro a las Tecnologías de la Información y la electrónica que fomentaron la automatización de los procesos y, finalmente, la actual Industria 4.0 se basa en los Sistemas Ciberfísicos y promueve los sistemas de manufactura inteligentes [12]. Aunque la Industria 4.0 todavía no se establece del todo y no está madura, muchos pioneros de la industria y líderes tecnológicos miran hacia la Quinta Revolución Industrial o Industria 5.0 [13]. Este paradigma tecnológico se caracteriza por la fabricación autónoma y personalizable y se fortalecerá cuando sus tres elementos principales: 1) Dispositivos inteligentes, 2) Sistemas inteligentes y 3) la Automatización inteligente se fusionen plenamente con el mundo físico en cooperación con la inteligencia humana, lo que fomentará el regreso de los trabajadores al centro de la producción. En la Industria 5.0 se generalizará el uso de Cobots (robots colaborativos), se promoverán las relaciones hombre-máquina, se considerará la sustentabilidad como meta y se contará con una la manufactura personalizada.

Otros autores promueven una visión futurista del mundo industrial y pronostican que para el año 2050 se presentará la sexta revolución industrial que unirá la percepción humana, la inteligencia artificial, la energía inagotable de la nube y la impresión 3D con drones, para llevar a cabo los procesos de manufactura [14]. En todos estos cambios la computación cuántica mejorará la eficacia y productividad de los actuales modelos de la Inteligencia Artificial, al tiempo que permitirá la creación de otros totalmente nuevos. Das y Pan [15] proponen que el centro tecnológico de la Industria 6.0 serán: El Robot humanizado, la Realidad Aumentada/Realidad Virtual AR/VR, la computación cuántica, IoT (Internet de las cosas) y el big data.

Existen dos procesos de transición entre las Industrias 3.0, 4.0 y 5.0. La primera transición se denomina Industria 3.5 y se concibe como una estrategia híbrida de las industrias 3.0 y 4.0 con innovaciones disruptivas [16]. Dicho de otra manera, la Industria 3.5 representa la transición de la Industria 3.0 a la 4.0 y en ella se llevan a cabo procesos de reacondicionamiento o retrofitting, se promueve la globalización y el offshoring. La Industria 4.5 o Industria 4.0+ representa la transición de las Industria 4.0 a la 5.0 [17], aunque los autores describen estos símbolos como de uso poco común. Esta fase o transición promueve la adopción de soluciones digitales y la personalización en los procesos de manufactura. La Figura 1 muestra un mapa de ruta de las revoluciones industriales descritas anteriormente.

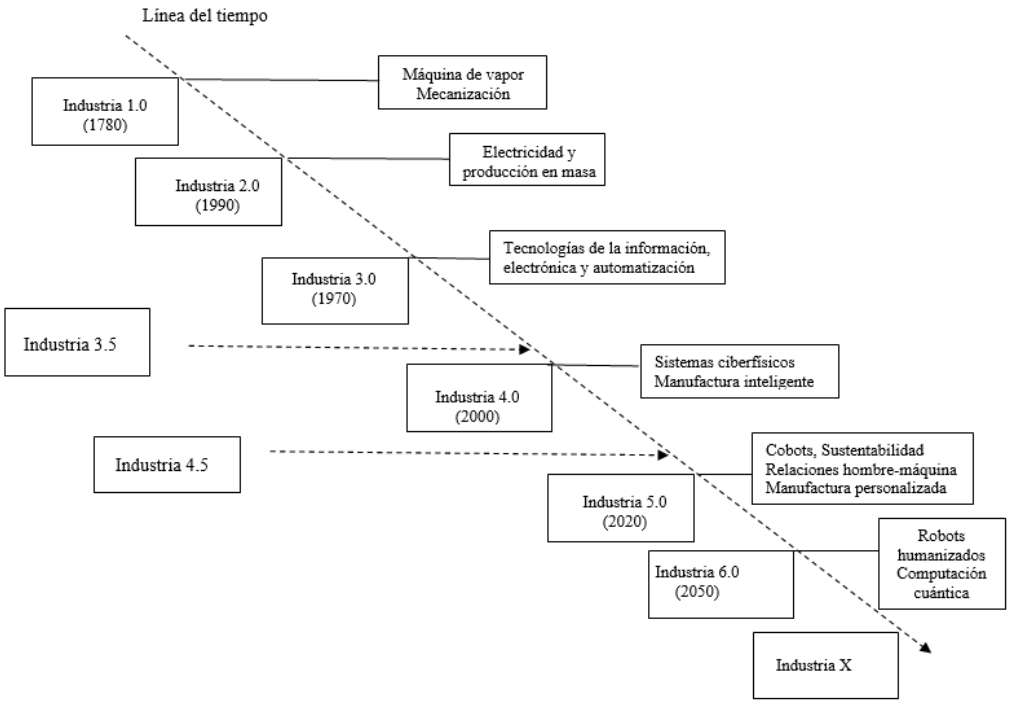


Figura 1. Mapa de ruta de las revoluciones industriales

3. Las tecnologías disruptivas de la Industria 4.0 y la Educación

La Industria 4.0 o cuarta revolución industrial, es un paradigma tecnológico que está cambiando de forma y fondo muchos procesos industriales, y sus aplicaciones se han reflejado en diversas realidades de esta sociedad como en los negocios, la salud, la construcción y la educación, entre otras. Este cambio industrial está motivado por la introducción de nuevas y modernas tecnologías disruptivas en los procesos productivos. Las tecnologías disruptivas se pueden considerar como aquellas que conforman paradigmas tecnológicos o de mercado totalmente nuevos. Dicho de otro modo, las tecnologías disruptivas son avances de la tecnología moderna que destruyen los métodos tradicionales [18]. La Figura 2 muestra algunas tecnologías disruptivas en los procesos productivos.

Figura 2. Ejemplos de tecnologías disruptivas en los procesos

Aunque no existe une definición general de la Industria 4.0, algunos autores han propuesto algunas de ellas, por ejemplo, Oztemel y Gursev [19], describen que “la Industria 4.0 define una metodología para generar una transformación de la fabricación dominante por las máquinas a la fabricación digital”, mientras que Gubán y kovács [20] mencionan que “la esencia de la concepción de

la Industria 4.0 es la introducción de sistemas inteligentes conectados en red, que realizan una producción autorregulada y que las personas, máquinas, los equipos y productos se comunicarán entre sí". En la era de la cuarta revolución industrial las fábricas, sus sistemas de producción y las cadenas de suministro tenderán hacia la hiperautomatización usando redes avanzadas y mejores métodos de comunicación integrando a este proceso de reconversión tecnologías disruptivas. En general, es posible afirmar que la Industria 4.0 busca optimizar los sistemas diseñados bajo el paradigma de la Industria 3.0 utilizando tecnologías disruptivas. Por otro lado, no existe consenso entre los investigadores para decidir que tecnologías soportan a las Industria 4.0. Hernandez et al. [21] propone nueve pilares tecnológicos, los cuales se muestran en la Figura 3.

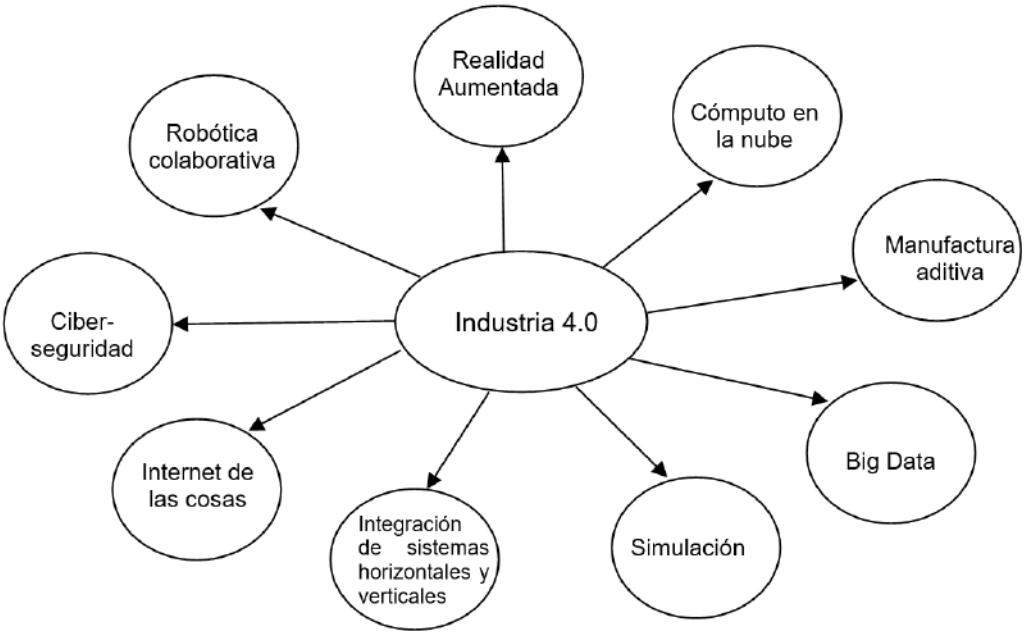


Figura 3. Nueve pilares de la Industria 4.0 [21]

La Industria 4.0 tiene dos tecnologías de fondo: los sistemas ciberfísicos y los gemelos digitales. De hecho, diversos autores mencionan que los Sistemas Ciberfísicos son el centro o corazón de la Industria 4.0 [12]. De acuerdo con Baheti y Gill [22], los sistemas ciberfísicos (CPS) representan una nueva generación de sistemas integrados con capacidades computacionales y físicas, y son capaces de interactuar con el ser humano de manera novedosa. A través de la computación, los CPS tienen la capacidad de interactuar con el mundo físico y ampliar sus potencialidades mediante la aplicación de la computación y la comunicación. Por otro lado, los gemelos digitales (DT) se refieren a las representaciones digitales de activos físicos, denominados gemelos físicos, incluidos sistemas, procesos y dispositivos [23]. La parte virtual y el activo físico están interrelacionados y la comunicación es en tiempo real. Los gemelos digitales (DT) y los sistemas ciberfísicos (CPS) son dos conceptos de apoyo independientes pero comparables para la fabricación inteligente o Industria 4.0. El principio de funcionamiento de ambos se basa en una estrecha interacción entre un objeto físico y su homólogo digital [24]. La interconexión del mundo real con el digital es la innovación más evidente que trae la Industria 4.0, y hará posible que las empresas e industrias transiten a un mundo con mejores oportunidades de negocios y nuevos retos y desafíos.

Por otro lado, la Industria 4.0 no solo está revolucionando los sistemas productivos, sino que trajo retos y desafíos en otras áreas, entre ellas a la Educación. Así como las tecnologías disruptivas están originado cambios de fondo y forma en las industrias, estos mismos recursos tecnológicos al ser introducidos en las escuelas y universidades, están causando una revolución en los procesos educativos. La Figura 4 muestra algunas tecnologías disruptivas relacionadas con la educación [25].

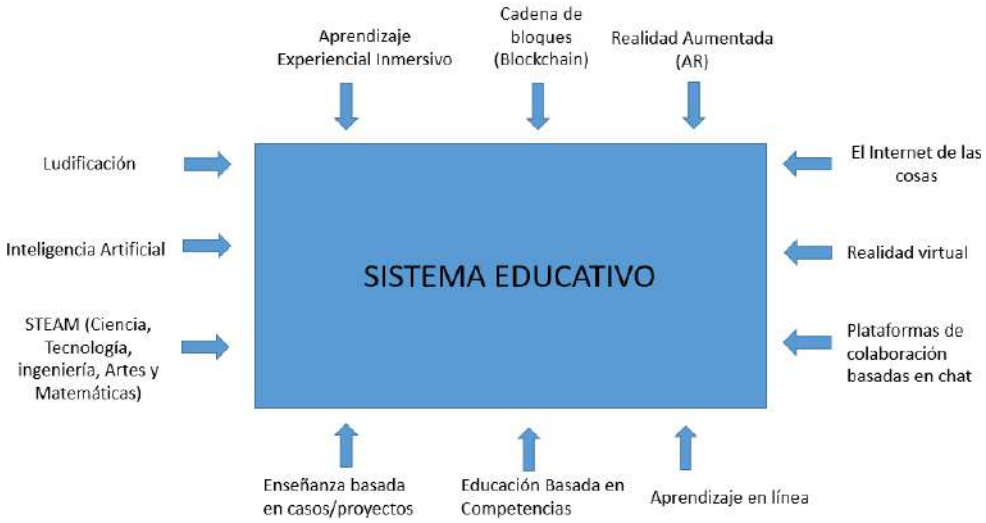


Figura 4. Tecnologías disruptivas en la educación

La gama de tecnologías disruptivas mostradas en la Figura 4 representa un punto de mejora e innovación para las escuelas y universidades ya que posibilitan el ofrecimiento de carreras nuevas y novedosas, mejoran los aprendizajes y permiten que aquellos alumnos que no puedan asistir a clases presenciales puedan acceder desde puntos remotos. Cabe señalar que la Inteligencia Artificial es poco usada aún en las universidades, pero su potencial de aplicaciones será amplio y extensivo en los próximos años. Por otro lado, al igual que las revoluciones industriales, la educación se ha transformado con el paso del tiempo y ha adquirido nuevos significados. Estas transformaciones educativas se pueden observar en la Figura 5.

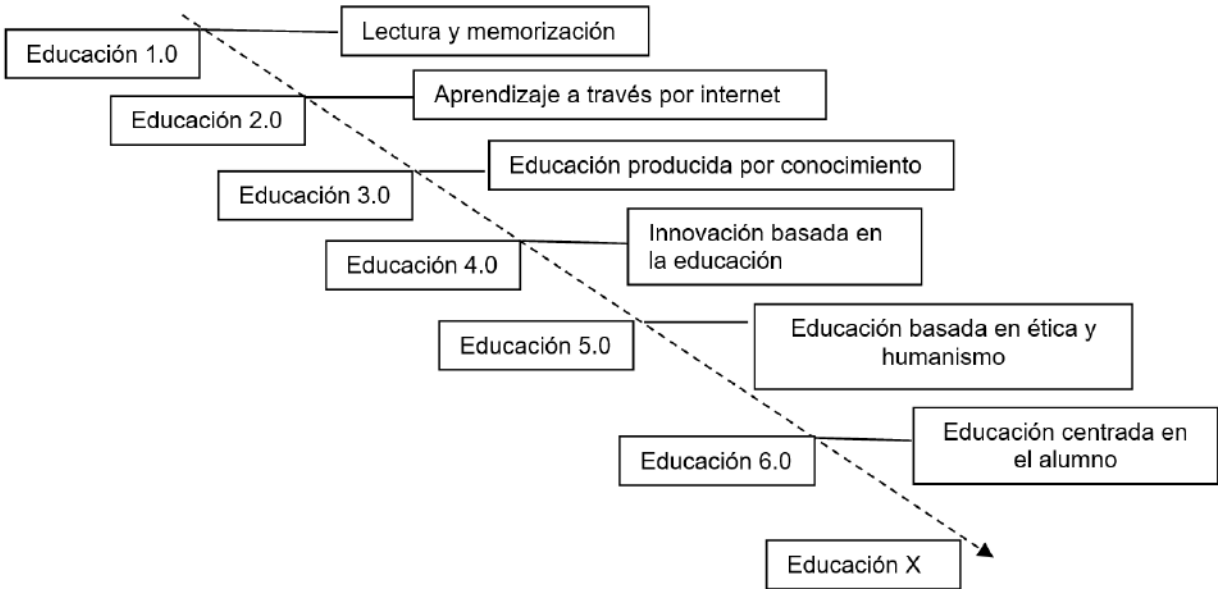


Figura 5. Transformaciones educativas: Mejorada de [26, 27]

De acuerdo con Ahmad [26], la educación ha pasado de la lectura y memorización de la Educación 1.0 al aprendizaje por Internet de la Educación 2.0, y de la educación basada en el conocimiento asociada con la Educación 3.0 a la educación basada en la innovación de la Educación 4.0. Cabe mencionar que la Educación 5.0 va más allá de la creación y el uso de la tecnología y se adentra en las esferas del humanismo y la ética, en tanto que la educación 6.0 estará centrada en el alumno y sus características clave que, de acuerdo con Moleka [27], serán las siguientes: 1) Autonomía

del alumno, 2) Integración equilibrada de la tecnología y el toque humano, 3) Desarrollo holístico, 4) Inteligencia espiritual, 5) Inteligencia emocional, 6) Habilidades para el futuro, 7) Integración de la Inteligencia Artificial, 8) Evaluación continua y 9) Entornos de aprendizaje flexibles.

4. La educación en Ingeniería 4.0 y la mecatrónica

La Educación 4.0 es un nuevo enfoque educativo que se formó para poder satisfacer los requerimientos de la Industria 4.0 y busca transformar la educación presente y futura mediante el uso las tecnologías disruptivas, la digitalización y la automatización. Este nuevo paradigma educativo introduce una serie herramientas tecnológicas en los procesos de la enseñanza y el aprendizaje tales como: el Internet de las cosas, la Inteligencia Artificial, los macrodatos, la Realidad Aumentada y el e-learning, entre otras. Las tecnologías disruptivas aplicadas a la educación son capaces de impulsar nuevos métodos de enseñanza y pedagogías que pueden satisfacer mejor las necesidades de los alumnos en la era digital [28]. Una parte de la Educación 4.0 que se orienta a la formación de Ingenieros se le conoce como Educación en Ingeniería 4.0. Este campo de la educación presenta grandes retos y desafíos pues es en la ingeniería en donde se basan muchas aplicaciones industriales. Para poder alinearse a los requisitos de la Industria 4.0 los ingenieros deben aprender a aplicar principios científicos y matemáticos para diseñar, desarrollar y utilizar, mantener, integrar, interconectar, controlar y analizar estructuras, máquinas, materiales, sistemas y software, entre otras acciones [29].

Le Educación en Ingeniería 4.0 integra a los ingenieros mecatrónicos y busca que se alineen a la Industria 4.0. La mecatrónica tuvo su origen a finales de los años 70 y en conjunto con la electrónica, las tecnologías de la información y la automatización, formaron la base de la Industria 3.0. Hoy en día, la mecatrónica es una de las ciencias innovadoras y un campo de estudio estrechamente relacionado con los nuevos retos conocidos como Industria 4.0. [30]. Debido a la multidisciplinaridad de la mecatrónica, se requiere cambiar la forma tradicional de enseñar, introducir tecnologías disruptivas a su proceso educativo, transformar los laboratorios y poner en marcha nuevos cursos y modificar los convencionales para adaptarlos a los requisitos de la industria 4.0.

Extrapolando lo mencionado por Ioniță, et al [6], la Educación en Ingeniería, y en especial la Mecatrónica, debe buscar reconstituirse sobre la base de los cuatro pilares de la Educación 4.0, es decir, en el pilar de las tecnologías, en los procesos, métodos didácticos y competencias. Con respecto al último pilar y de acuerdo con Haralanova [31], las competencias 4.0 están surgiendo de la Industria 4.0. Es decir, el estudio de las competencias que demanda la Industria 4.0 el cual tienen tres pilares: 1) Competencias digitales, 2) Competencias sociales y emocionales y 3) Competencias cognitivas, además se deben considerar las competencias de la Industria 3.0. La complejidad técnica de los nuevos sistemas productivos es la mejor evidencia de que se requiere el diseño de nuevas competencias en los ingenieros mecatrónicos, por ejemplo, el estudio de los sistemas mecatrónicos se ha estado modificando por los cambios en la arquitectura de los sistemas productivos, debido al aumento de las redes y la personalización que trae consigo la Industria 4.0. Al inicio los sistemas productivos tenían una configuración general, es decir, más mecánica, posteriormente con la inserción del software y la electrónica se concibieron los sistemas mecatrónicos y hoy en día los nuevos sistemas integran inteligencia distribuida, interconexión de plataformas y servicios, comunicación M2M (máquina a máquina) e interacción hombre-máquina [32]. Los ingenieros mecatrónicos tendrán el reto de comprender, operar y desarrollar sistemas tecnológicos complejos e inteligentes llamados sistemas ciberfísicos.

Las tareas de los ingenieros mecatrónicos son esenciales para la implementación de las Industrias 4.0 y 5.0, por lo que es necesario que su formación se transforme de acuerdo con las necesidades y requerimientos de las actuales revoluciones industriales. Por su carácter integrador, la mecatrónica se asemeja a la Industria 4.0, ya que precisamente esta nueva visión empresarial trata de integrar tecnologías disruptivas a los procesos productivos buscando su mejora y optimización. Sin embargo, debe entenderse que la Industria 4.0 implica un cambio real en los procesos industriales y no consiste en simples mejoras generadas por la incursión de tecnologías. Este hecho tiene importantes implicaciones en la formación de los ingenieros, ya que no se trata sólo de capacitarlos en el

conocimiento y en las aplicaciones específicas o integradas de las tecnologías disruptivas, sino que requiere cambios profundos en las metodologías productivas y en la educación [33].

Para diseñar el nuevo papel que juega el ingeniero mecatrónico en la cuarta revolución industrial, es necesario que se tomen en cuenta el pasado, presente y futuro de los paradigmas tecnológicos y educativos, ya que cada uno de ellos representa la mejora de los anteriores y aportan información relevante, sobre todo para conocer las tareas de la ingeniería en las transiciones entre revoluciones y para implementar estrategias educativas modernas en las universidades. Se requiere pasar de la educación en mecatrónica tradicional a la Educación en Ingeniería Mecatrónica 4.0 y eso implica renovar los planes de estudio, modernizar y alinear los laboratorios universitarios hacia el conocimiento de las nuevas tecnologías, desarrollar nuevas competencias, promover la digitalización, motivar al trabajo colaborativo con otras ingenierías, integrar tecnologías disruptivas en el proceso de la enseñanza y migrar hacía las nuevas las pedagogías disponibles, entre otras tareas. Al mismo tiempo, las universidades deben modernizarse e iniciar las transformaciones hacia la universidad digital o Universidad 4.0 que implica alinear los procesos educativos y administrativos hacia los requisitos de la cuarta revolución industrial.

4. Conclusiones

En este artículo se ha presentado un panorama acerca de las revoluciones industriales y educativas, y se describieron algunas consideraciones sobre la enseñanza de la mecatrónica. Las principales conclusiones se sintetizan en los puntos siguientes:

- La Educación en Ingeniería que se practica en México debe iniciar la migración hacía la Educación en Ingeniería 4.0 y tiene que aprovechar las tecnologías disruptivas disponibles para formar a los ingenieros que demanda la Industria 4.0
- La Educación de la Ingeniería Mecatrónica actual debe ser mejorada y actualizada ya que juega y jugará un papel muy importante en la implementación de la Industria 4.0. Acorde con la visión de la Educación 4.0, la Ingeniería Mecatrónica debe adaptar las nuevas pedagogías disponibles e introducir las tecnologías disruptivas en el proceso educativo de los ingenieros.
- El diseño de las competencias para los ingenieros mecatrónicos será un reto a considerar en el presente y futuro, debido a las mejoras tecnológicas de los sistemas productivos y a la inserción de nuevas habilidades digitales.
- Para construir una visión de la ingeniería alineada a la Industria 4.0 se requiere tomar los acontecimientos tecnológicos y educativos del pasado, del presente y el futuro debido a que cada revolución industrial y educativa es una mejora de las anteriores y a que los tiempos entre un paradigma industrial y otro se están acortando.

La Ingeniería mecatrónica representa una de las áreas de aplicación fundamentales para la Industria 4.0, por lo que es necesario que se lleven a cabo más investigaciones en Educación en Ingeniería 4.0 en el área de la mecatrónica para poder formar y alinear a los ingenieros de la cuarta revolución industrial, es decir, el Ingeniero Mecatrónico 4.0.

Referencias

[1] Magd, H., Jonathan, H., Khan S.A., El Geddawy M. Artificial Intelligence—The Driving Force of Industry 4.0, In: A Roadmap for Enabling Industry 4.0 by Artificial Intelligence, Chatterjee J.M., Garg H. and Thakur R. N. Eds. Wiley Global Headquarters, NJ, USA. 2023.

[2] Kagermann, H., W. Wahlster and J. Helbig, eds., 2013: Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group. 2013.

[3] Bongomin, O., Ocen, G.G., Oyondi, E., Musinguzi, A., Omara, T. Exponential Disruptive Technologies and the Required Skills of Industry 4.0, Journal of Engineering, ID 4280156, 2020. https://doi.org/10.1155/2020/4280156

[4] Hariharasudan, A., Sebastian Kot. A Scoping Review on Digital English and Education 4.0 for Industry 4.0, Social Sciences, 7, 227. 2018. Doi:10.3390/socsci7110227
[5] Akturk, C., Talan, T., and Cerasi, C.C. Education 4.0 and University 4.0 from Society 5.0 Perspective, 2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Ruzomberok, Slovakia, 2022, pp. 577-582, doi: 10.1109/ACIT54803.2022.9913099.
[6] Ioniță, M., Mihailescu, B., Rachbauera, T., Hansen C., Gheorghe C., Svasta, P. Fostering Engineering Education 4.0 Paradigm Facing the Pandemic and VUCA World, 4th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing, Procedia Computer Science 217, pp.177–186. 2023.
[7] Chakrabarti, S.,Caratozzolo, P., Norgaard, B., Sjoer, E. Preparing Engineers for Lifelong Learning in the Era of Industry 4.0, *2021 World Engineering Education Forum/Global Engineering Deans Council (WEEF/GEDC)*, Madrid, Spain, pp. 518-523, 2021, doi: 10.1109/WEEF/GEDC53299.2021.9657247.
[8] Jeganathan, L., Khan, A.N., Kannan J., Narayanasamy, S. "On a Frame Work of Curriculum for Engineering Education 4.0," *2018 World Engineering Education Forum - Global Engineering Deans Council (WEEF-GEDC)*, Albuquerque, NM, USA, 2018, pp. 1-6, 2018. doi: 10.1109/WEEF-GEDC.2018.8629704.
[9] Villas S., La primera revolución industrial, Boletín de la Academia Malagueña de Ciencias, pp. 43-50. 2012.
[10] Lambrechts, W., Sinha, S., Marwala, T. The Global South and Industry 4.0: Historical Development and Future Trajectories. In The BRICS Order, 1st ed.; Monyae, D., Ndzendze, B., Eds.; Palgrave Macmillan: Cham, Switzerland, pp. 249–281. 2021
[11] Popkova, E.G., Ragulina, Y.V., Bogoviz, A.V. Fundamental Differences of Transition to Industry 4.0 from Previous Industrial Revolutions. In: Popkova, E., Ragulina, Y., Bogoviz, A. (eds) Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century. Studies in Systems, Decision and Control, vol 169. Springer, Cham. 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94310-7_3
[12] Benotsmane, R., Kovács, G., Dudás, L. Economic, Social Impacts and Operation of Smart Factories in Industry 4.0 Focusing on Simulation and Artificial Intelligence of Collaborating Robots. *Soc. Sci.* 2019, *8*, 143. https://doi.org/10.3390/socsci8050143
[13] Nahavandi, S. Industry 5.0—A Human-Centric Solution, Sustainability, 11, 4371. 2019.
[14] Yadav, R., Arora, S., Dhull, S. A path way to Industrial Revolution 6.0, International Journal of Mechanical Engineering, 7 (1), pp. 1452-1459, 2022.
[15] Das, S., Pan, T. A strategic outline of Industry 6.0: Exploring the Future, 2022. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4104696
[16] Chen, C., Tzu, H., Hong, G. A Conceptual Framework for “Industry 3.5” to Empower Intelligent Manufacturing and Case Studies, Procedia Manufacturing,11, pp. 2009-2017. 2017.
[17] Xu, X., Lu, Y., Vogel, B., Wang, L. Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception, Journal of Manufacturing Systems (61), pp. 530-535, 2021.
[18] Priyashantha, K.G. Disruptive technologies for human resource management: a conceptual framework development and research agenda, Journal of Work-Applied Management, 15 (1), pp. 21-36. 2023.
[19] Oztemel, E., Gursev, S. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. J Intell Manuf. 31, pp. 127–182. 2020. https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8
[20] Gubán, M., kovács, G. Industry 4.0 conception. ACTA TECHNICA CORVINIENSIS – Bulletin of Engineering, pp. 111-104. 2017.
[21] Hernandez, G.M., Habib, L., Garcia, F.A., Montemayor, F. Industry 4.0 and Engineering Education: An Analysis of Nine Technological Pillars Inclusion in Higher Educational Curriculum. In Best Practices in Manufacturing Processes, 1st ed.; García, J., Rivera,

L., González, R., Leal, G., Chong, M., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, pp. 525–543. 2019.

[22] Baheti, R., Gill, H. Cyber-physical systems, Impact Control Technol. 12,1, pp.161–166, 2011.

[23] Lu, y., Liu, C., Kevin, I., Wang, K., Huang, H., Xu, X. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 61, 101837. 2020.

[24] Hsu, Y., Chiu, J.M., Liu, J.S. Digital Twins for Industry 4.0 and Beyond, *2019 IEEE International* Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Macao, China, 2019, pp. 526-530, 2019. Doi: 10.1109/IEEM44572.2019.8978614.

[25] Gejendhiran, S., Arokia, S., Vignesh, S., Kalaimani, M. Disruptive Technologies - A promising key for Sustainable Future Education. Procedia Computer Science, 172, pp. 843–847. 202.

[26] Ahmad, I., Sharma, S., Singh, R., Gehlot, A., Priyadarshi, N., Twala, B. MOOC 5.0: A Roadmap to the Future of Learning. Sustainability 2022, 14, 11199. https://doi.org/ 10.3390/su141811199

[27] Moleka, P. Dispelling the Limitations of Education 5.0 and Outlining the Vision of Education 6.0. Preprints, 2023071703, 2023. Doi: 10.20944/preprints202307.1703.v1

[28] Dhivya, D., Hariharasudan, A., Nishad N. Unleashing potential: Multimedia learning and Education 4.0 in learning Professional English Communication, Cogent Social Sciences, 9: 2248751. 2023. https://doi.org/10.1080/23311886.2023.2248751

[29] Jeganathan, L., Nayeemulla, A., Kannan, J., Narayanasamy, N. On a Frame Work of Curriculum for Engineering Education 4.0, 2018 World Engineering Education Forum - Global Engineering Deans Council (WEEF-GEDC). 2018. doi:10.1109/weef-gedc.2018.8629704

[30] Kozák, A., Ružický, E., Štefanovič, J., Schindler, F. Research and education for industry 4.0: Present development," 2018 Cybernetics & Informatics (K&I), Lazy pod Makytou, Slovakia, pp. 1-8, 2018. doi: 10.1109/CYBERI.2018.8337556.

[31] Poszytek, P., Hyrcza, M., Brodny, J., Wawrzała, P., Gebal, P, Lisok, J., Kruszewska, J., Sigurðardóttir, A.G., Bugnova, M., Dobrowolska, M. Theoretical Review of Research to Date on Competences 4.0—What Do We Know about Competences in Industry 4.0? A Status Quo Analysis. Sustainability, 15, 12267. 2023. https://doi.org/10.3390/ su151612267

[32] Eichinger, P., Höfig, B., Richter, C. Education 4.0 for Mechatronics – Agile and Smart, " 2017 International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM), Wolfenbuettel, Germany, pp. 1-7, 2017. Doi: 10.1109/REM.2017.8075231.

[33] Jimenez, E., Cuenca, F., Luna, G., Ochoa, F. J., Maciel, M. A., Muñoz F., Limón P. A. Technical Considerations for the Conformation of Specific Competences in Mechatronic Engineers in the Context of Industry 4.0 and 5.0. Processes.10, 2022, pp. 1445. https://doi.org/10.3390/pr10081445

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 31, pp. 397 – 410
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Plataforma experimental de un robot omnidireccional para control

Alcaraz Ponce Christofer[1], Gudiño Lau Jorge[1], García Herrera Edgar[2], López Jiménez Luís[3], Charre Ibarra Saida[1] y Velázquez Acosta Luis[1]

Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima[1], Universidad de Guadalajara[2], Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca[3] e-mail: jglau@ucol.mx

Resumen

El objetivo de la investigación es desarrollar un método de control robótico utilizando visión por computadora como retroalimentación para controlar un robot móvil omnidireccional. Esto permite aplicar la robótica móvil en la asistencia personal para mejorar la calidad de vida de las personas con discapacidad. Se aborda el procesamiento de imágenes y la segmentación de imágenes, así como los modelos de color y el modelado de cámaras. Se menciona el protocolo de comunicación MQTT "Message Queuing Telemetry Transport" (Transporte de Telemetría de Colas de Mensajes, en español). como un medio de comunicación inalámbrico. Además, se muestran resultados experimentales del controlador en un robot móvil omnidireccional.

Palabras clave: Robot, omnidireccional, control y visión.

1. Introducción

En los últimos años, la robótica ha tenido un avance significativo que ha transformado radicalmente los sectores productivos y sociales. Desde la implementación de inteligencia artificial y aprendizaje profundo en robots hasta el desarrollo de exoesqueletos biónicos capaces de restaurar la movilidad, la innovación en robótica ha evolucionado significativamente. La miniaturización de componentes electrónicos y avances en materiales han dado lugar a robots más pequeños y ágiles, utilizados en campos como la medicina, agricultura, la exploración espacial, por mencionar algunos. En resumen, la robótica ha dejado de ser ciencia ficción para convertirse en una realidad que promete cambiar la forma en que vivimos y trabajamos. El término robot apareció por primera vez en 1921, este término ha sido ampliamente aceptado y es como se les conocen hoy en día a todos los autómatas [1]

Los robots pueden clasificarse por su sistema de locomoción, es decir, a la forma en que un robot se mueve y se desplaza en su entorno, para moverse de un lugar a otro, como se observa en la Figura 1. El sistema de locomoción de los robots es un concepto importante porque la forma y estructura de los robots condicionan en gran manera su funcionamiento y prestaciones, así como su campo de aplicación.

La Figura 1 muestra el sistema de locomoción de los robots, de acuerdo con las características de este robot puede ser: aéreos, terrestre y acuáticos. Los robots aéreos son diseñados para moverse en el aire, como drones y vehículos aéreos no tripulados (UAV). Los robots terrestres se mueven en superficies sólidas regulares e irregulares, como el suelo, y pueden variar en diseño y su aplicación. Los robots acuáticos se diseñan para operar en entornos acuáticos, como océanos, ríos o lagos.

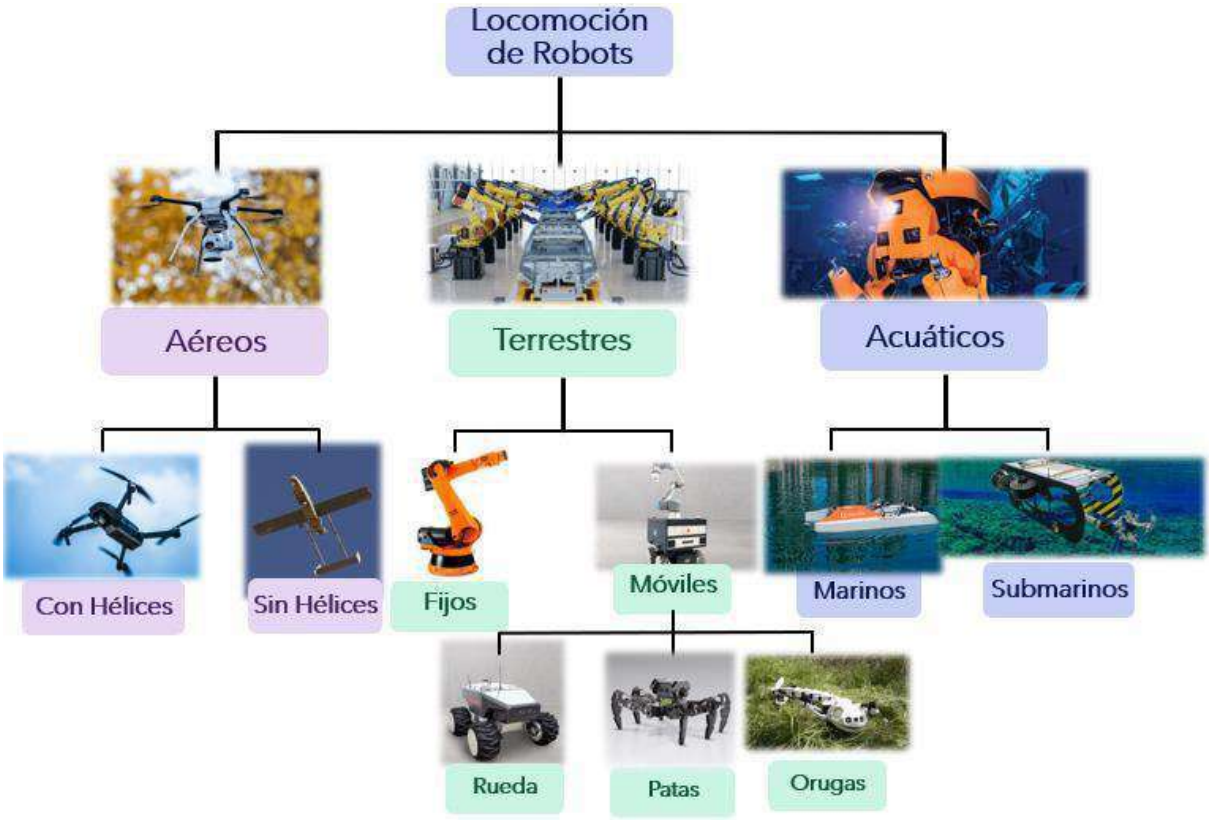


Figura 1. Sistema de locomoción de los robots.

En la robótica móvil, los estudios fundamentales de esta área se centran en el posicionamiento, seguimiento de trayectoria y evasión de obstáculos. En relación con esto, se han generado diversos trabajos de investigación, materias como la odometría y la topología son toman un papel importante en estos estudios [2,3].

El sistema de locomoción de los Robots Móviles con Ruedas (RMR) han venido evolucionando de manera significativa, ya que son más eficientes en cuanto a energía en superficies lisas, homogéneas y firmes, normalmente menos complejas en comparación con los robots de patas y de orugas, lo que permite que su construcción sea más sencilla y fácil de controlar. Los RMR utilizan ruedas como sus principales medios de desplazamiento, lo que los hace adecuados para una amplia variedad de aplicaciones.

En lo referente a las partes de las que se compone un RMR, se tiene un arreglo cinemático y un sistema de actuadores, que dotan de movimiento a la estructura cinemática. Los RMR están equipados con una o más ruedas, dependiendo de su diseño y aplicación específica. Cada rueda generalmente está conectada a un motor eléctrico que proporciona la potencia necesaria para girar la rueda y mover el robot. La ubicación y la disposición de las ruedas pueden variar según el diseño del robot y el tipo de aplicación.

Las configuraciones cinemáticas para los RMR se refieren a la disposición y el diseño de las ruedas y los sistemas de dirección que determinan cómo se moverá y maniobrará el robot. Cada configuración cinemática tiene sus propias características y ventajas, y la elección de una configuración en particular depende de la aplicación específica del robot. En la Figura 2 se muestra las configuraciones cinemáticas para los RMR:

a) **Ackerman**: Esta configuración se asemeja a la dirección de un automóvil convencional, donde todas las ruedas están orientadas hacia una dirección común, pero pueden girar a diferentes velocidades para permitir giros suaves. Es eficaz para maniobrar en espacios estrechos.

b) **Triciclo clásico:** En esta configuración, el robot tiene dos ruedas motrices en la parte trasera y una rueda orientable en la parte delantera. Permite un giro más preciso al girar la rueda delantera.

c) **Tracción diferencial:** En esta configuración, dos ruedas motrices son colocadas en el mismo eje, y el control se logra variando la velocidad de rotación de cada una de ellas. Es una configuración simple y eficaz para moverse en línea recta y girar en el lugar.

d) **Skid steer:** En esta configuración, las ruedas en lados opuestos del robot giran en direcciones opuestas para lograr giros cerrados. Es común en vehículos como los tractores y excavadoras.

e) **Síncrona:** En esta configuración, todas las ruedas se mueven de manera sincronizada y a la misma velocidad. Es útil cuando se necesita un movimiento suave y estable.

f) **Tracción omnidireccional:** Esta configuración utiliza ruedas especiales conocida como mecano que permiten al robot moverse en cualquier dirección sin necesidad de cambiar la orientación. Es excelente para la maniobrabilidad en espacios reducidos.

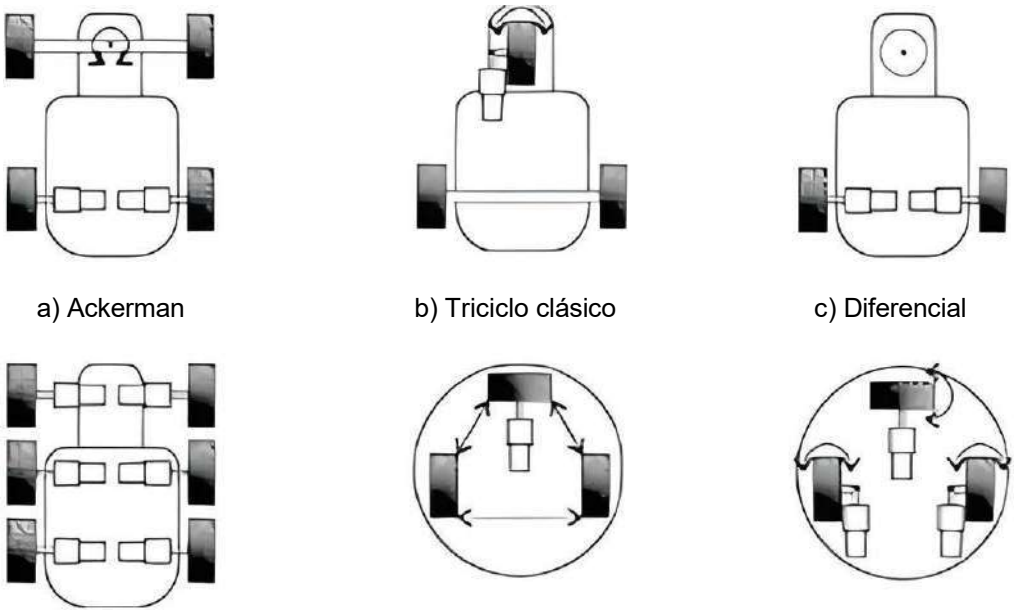


Figura 2. Tipos de sistemas de desplazamiento con ruedas

La robótica móvil puede ser divida principalmente en tres ramas de acuerdo con el tipo de desplazamiento: dependiendo del tipo de desplazamiento: robots de ruedas (a), robots de patas (b), y robots de orugas (c), como se observa en la Figura 3 [2]. Debido a la gran cantidad de estudio que hay detrás de los sistemas móviles de ruedas y su relación con los vehículos modernos, la robótica móvil de ruedas ha evolucionado de manera significativa en los últimos años. Con el objetivo de mejorar estos sistemas, se han planteado distintas mejoras, desde agregar sistemas robóticos manipuladores, también conocidos como robots híbridos, cambiar la cantidad de ruedas en el robot, hasta nuevos diseños de ruedas, este último ha tenido gran impacto que se considera como una división propia de los robots móviles de ruedas.

Se tienen cuatro tipos de ruedas para los RMR dependiendo de su configuración que son mostrados en la Figura 4:

a) Ruedas Omnidireccionales: Las ruedas omnidireccionales son ruedas especiales diseñadas para permitir que un robot se mueva en cualquier dirección sin necesidad de cambiar su

orientación. Estas ruedas tienen pequeños rodillos dispuestos en ángulo alrededor del perímetro de la rueda. Esto permite que el robot pueda moverse hacia adelante, hacia atrás, girar a la izquierda, girar a la derecha y diagonalmente con gran facilidad. Las ruedas omnidireccionales son ideales para lograr una alta maniobrabilidad en espacios reducidos y son comunes en robots utilizados en aplicaciones de logística, como robots de almacén.

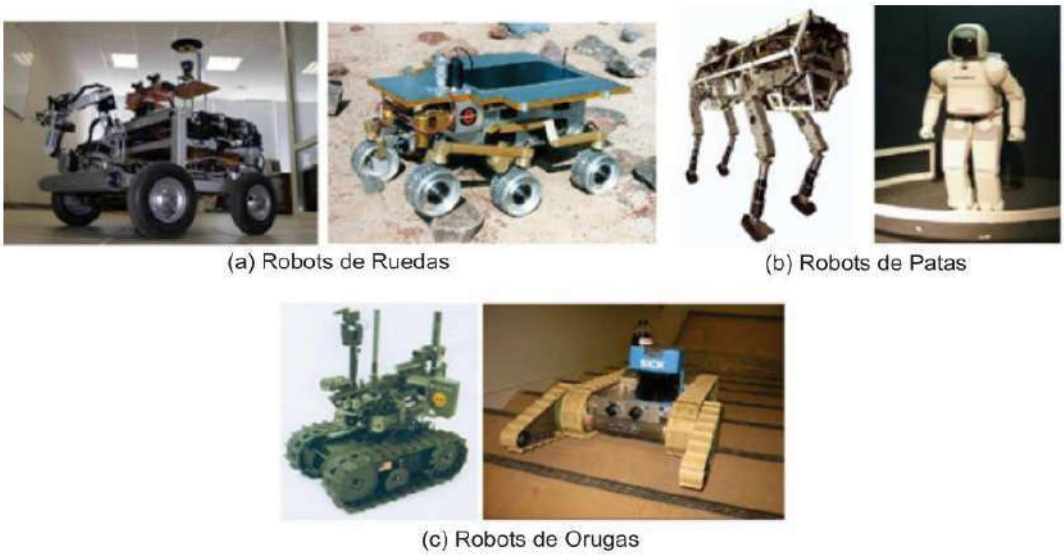


Figura 3. Tipos de locomoción en un robot móvil [2]**.**

b) **Ruedas Convencionales:** Las ruedas convencionales se utilizan en configuraciones más simples de RMR. Estas son ruedas típicas que giran alrededor de un eje fijo. Los RMR con ruedas convencionales pueden moverse hacia adelante y hacia atrás girando sus ruedas en una dirección determinada. Para cambiar de dirección, el robot debe ajustar la orientación de todo el cuerpo. Estas ruedas son efectivas para movimientos básicos y son comunes en aplicaciones donde la maniobrabilidad extrema no es esencial.

c) **Ruedas Tipo Castor (o Ruedas Locas):** Las ruedas tipo castor son ruedas que giran libremente en cualquier dirección y se utilizan generalmente en la parte delantera o trasera de un RMR. Estas ruedas permiten que el robot cambie de dirección de manera más eficiente, ya que pueden girar en su lugar sin necesidad de girar todo el robot. Las ruedas tipo castor son comunes en configuraciones triciclo clásico y pueden mejorar la capacidad de giro.

d) **Ruedas de Bolas (Ball Casters):** Las ruedas de bolas son ruedas pequeñas que consisten en una bola en la parte inferior montada en un soporte. Estas ruedas se utilizan para proporcionar un soporte adicional y estabilidad al robot. Se pueden montar en la parte inferior del robot para ayudar en la distribución del peso y reducir la fricción al moverse sobre superficies lisas. Las ruedas de bolas son comunes en robots de carga o robots que necesitan mantener una plataforma nivelada.

En este artículo, se trabaja con un robot terrestre móvil con ruedas del tipo omnidireccional, están diseñadas para permitir el movimiento en múltiples direcciones sin necesidad de cambiar la orientación del robot. Estas ruedas tienen rodillos en ángulos específicos que permiten que el robot se desplace hacia adelante, hacia atrás, hacia los lados y en diagonal con facilidad y de forma rápida. Además, tiene sensores que permiten monitorear a cada momento su posición relativa a su punto de origen y a su punto de destino. Su control es en lazo cerrado, la retroalimentación es a través de visión.

Figura 4. Tipos de rueda para un robot móvil [2]**.**

2. Estado del arte

2.1 Robótica móvil

La implementación y análisis de algoritmos de control de trayectorias de una plataforma robótica omnidireccional es mostrado en [4]. El estudio consiste en la implementación de control de trayectorias basado en el modelo cinemático de una plataforma robótica omnidireccional con cuatro ruedas de tipo mecanum, en un entorno controlado, que permite movimientos instantáneos en cualquier dirección sin necesidad de maniobras extra. El desarrollo del modelo cinemático del robot se realiza dentro del simulador Gazebo y la implementación del control del prototipo utiliza raspberry y programación ROS. La comunicación entre los componentes del sistema se establece mediante protocolos de comunicación TCPROS y UDPROS. El sistema de control de trayectoria realiza seguimiento de las trayectorias preestablecidas, tanto en el entorno simulado como en el entorno físico.

En Amaguaña [5] realiza un control de velocidad de motores brushless aplicado a un robot omnidireccional. A través de espacios de estados se modela el funcionamiento de la velocidad y como varia esa velocidad en los motores brushless, se muestra la función de transferencia del motor brushless y los parámetros del controlador PID mediante el método Zielger –Nicholls.

El diseño de un mecanismo de movimiento compuesto llamado rueda mecanum de radios flexibles y la construcción de un robot móvil, con múltiples modos de movimiento basados en la rueda mecanum es mostrado en Leng, *et. al.* [6]. Además, muestra un modo de movimiento omnidireccional para este robot, que le permite moverse con flexibilidad en todas las direcciones y atravesar con éxito terrenos accidentados. Además, tiene un modo de movimiento de rastreo para este robot, que puede subir escaleras de manera efectiva. Utilizan un método de control multicapa para mover el robot de acuerdo con los modos de movimiento diseñados.

En Deepak, *et. al.* [7], muestra la estructura de los modelos cinemáticos de robots móviles con ruedas. El robot móvil con ruedas lo consideran como un cuerpo rígido y plano que se desplaza sobre un número arbitrario de ruedas. Además, muestra una clase de posibles configuraciones de ruedas: ruedas estándar fijas, ruedas estándar dirigibles, ruedas giratorias, ruedas suecas y ruedas esféricas. Además, proponen un modelo cinemático y estudia el grado de movilidad, direccionabilidad y maniobrabilidad. Este análisis se aplica a varios robots móviles con ruedas.

En el Neaz, et. al. [8] muestran un estudio sobre el diseñado un robot móvil automotriz omnidireccional para realizar tareas de logística industrial en entornos dinámicos y con mucho tráfico. Desarrollan un sistema de control que incorpora algoritmos de alto y bajo nivel e introducen una interfaz gráfica para cada sistema de control. Además, utilizan un microcontrolador altamente eficiente, myRIO, como computadora de bajo nivel para controlar los motores. Utilizan una Raspberry Pi 4, junto con una

PC remota, para la toma de decisiones de alto nivel, para mapear el entorno experimental, planificación de rutas y localización, mediante la utilización de múltiples sensores Lidar, IMU y datos de odometría. generado por codificadores de rueda. Emplean LabVIEW para la computadora de bajo nivel y el Sistema Operativo de Robot (ROS) para el diseño de la arquitectura de software de nivel superior.

2.2 Visión por computadora

En el trabajo visión computacional para instrumentación y navegación asistida usando métodos opto-digitales, se enfoca en el diseño de un método de visión computacional para estimar la posición y orientación de un robot móvil. Se realiza mediante la detección de líneas de carril gracias a la transformada de Hough, el método de Canny para detectar contornos en la escena, así como diversos procedimientos de procesamiento de imagen auxiliares para conseguir eliminar información no útil en los fotogramas que interfiera con la detección. Implementan algoritmos para ejecutar de manera más eficiente el proceso [9]. Además, muestran que el método tiene robustez y eficiencia satisfactorias y que los métodos opto-digitales son factibles para aplicaciones en navegación visual e instrumentación óptica en vehículos reales.

En Nagane y Mulani [10] describen la implementación de detección y seguimiento de objetos usando Matlab, esto con el objetivo de desarrollar software de seguimiento con posibles aplicaciones en seguridad, vigilancia y análisis por visión. Utilizan un algoritmo en el cual se extrae una imagen de un video la cual es convertida del modelo RGB a escala de grises, esta imagen es sometida a un algoritmo basado en el filtrado de mediana, el filtro Kalman y coincidencia dinámica en plantillas. El algoritmo presenta precisión y efectividad detectando un solo objeto en movimiento aun con mala iluminación y puede ser extendido a procesamiento en tiempo real.

En el artículo segmentación de imágenes por características de color, presentan una revisión profunda del estado del arte sobre métodos de segmentación de imágenes en color; donde explican las técnicas basadas en detección de bordes, agrupamiento de características y redes neuronales. Debido a que los espacios de color juegan un papel clave, también explican los espacios de color más comunes para representar y procesar colores. Además, presentan algunas aplicaciones importantes que utilizan los métodos de segmentación de imágenes revisados [11].

La segmentación de imágenes en color para la detección y el aprendizaje de objetos requiere conocimientos de técnicas de procesamiento de imágenes a gran escala. La segmentación de imágenes en color se realiza para extraer no solo el color de la piel humana sino también el de otros objetos del fondo. Para mejorar este proceso de segmentación, las imágenes segmentadas pueden ir seguidas o integradas con cualquier otra operación morfológica [12].

3. Plataforma experimental

3.1 Cámara de video

Para este proyecto se trabaja con una cámara de video Logitech C920 Pro como el que se muestra en la Figura 5, para poder obtener la posición cartesiana y las dimensiones del robot omnidireccional en operación y así poder tener una visualización en tiempo real en la interfaz. Las especificaciones técnicas de esta cámara podemos verlas en la Tabla 1.

Figura 5. Cámara

Tabla 1. Especificaciones técnicas cámara Logitech.

Resolución máxima:	1080p/30 FPS - 720p/30 FPS
Cámara de megapíxeles:	3
Tipo de enfoque:	Enfoque automático
Tipo de lente:	Cristal
Micrófono integrado:	Estéreo
Rango del micrófono:	Hasta 1 m
Campo visual diagonal (dFoV):	7

3.2 Detección de posición

Para la detección de posición se utiliza un sistema de visión computacional conectado a una cámara Logitech C920 PRO-HD WEBCAM para hacer detección de la posición de un robot omnidireccional. Se realiza mediante el uso de la aplicación Color Tresholder que se encuentra en la plataforma de Matlab que trabaja con segmentación de color mediante el modelo HSV como se muestra en la Figura 6, es necesario proporcionar una imagen con el color a detectar y posteriormente ajustar los valores hasta que este sea lo único visible. Se obtienen máscaras binarizadas para detectar dos puntos de referencia de diferente color ubicados uno al frente y otro en la parte trasera del robot, como se observa en la Figura 7.

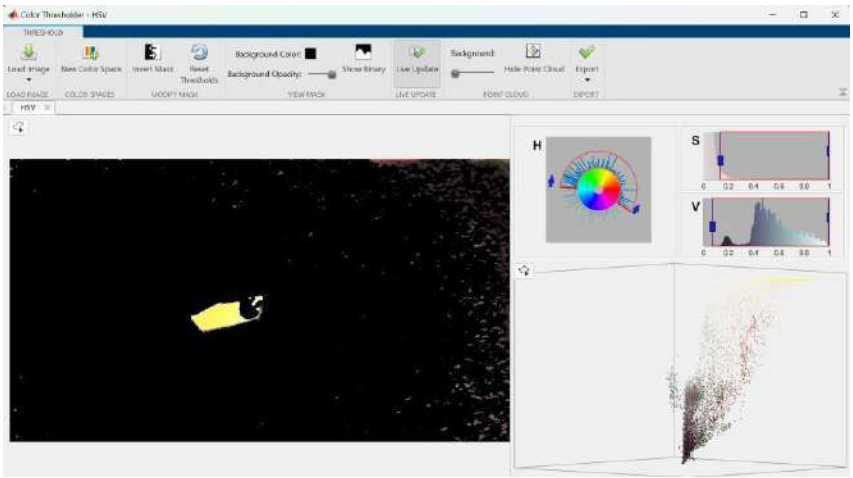


Figura 6. Interfaz de Color Tresholder App

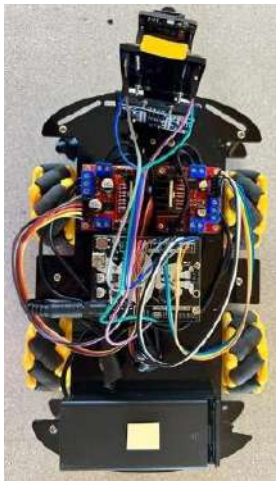


Figura 7. Máscaras binarizadas

Las máscaras binarizadas son imágenes binarias que se utilizan en procesamiento de imágenes y visión por computadora para resaltar regiones de interés o separar objetos del fondo. Estas imágenes se crean mediante la aplicación de un proceso de umbralización a una imagen original, donde se convierten los píxeles en blanco (valor 1) si cumplen ciertos criterios y en negro (valor 0) si no los cumplen.

3.3 Conectividad a internet

Para la conexión del sistema de visión y el controlador con el robot omnidireccional se utiliza el programa de código abierto Mosquitto, donde permite crear un bróker local que sirve como puente de comunicación entre los dispositivos, en la Figura 8 muestra el diagrama de conexión. En la parte del controlador se utiliza Matlab, y en la parte del robot se emplea la conexión a través del microcontrolador ESP32.

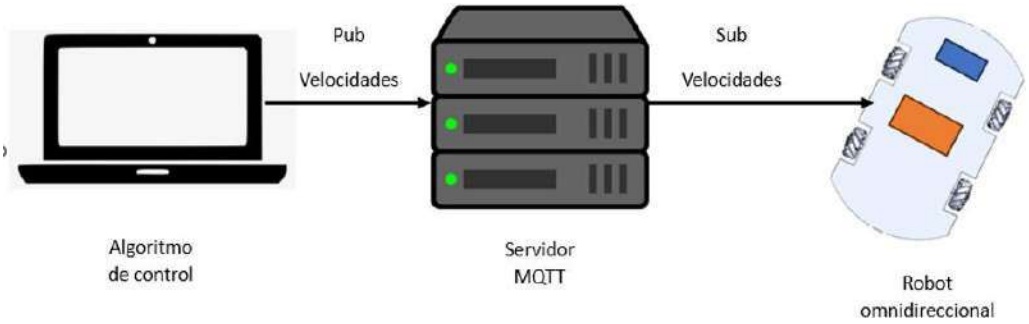


Figura 8. Diagrama de comunicación entre el controlador y el robot

El ESP32 se conecta a un Arduino UNO a través de su puerto SERIAL, donde se envían dichos valores. Una vez recibidos los datos, en Arduino se hace un procesamiento de los valores obtenidos y los convierte en valores aceptados por el módulo puente H, ya que este módulo cuenta con 2 pines digitales y 1 pin analógico para el control de motores, en donde los dos primeros se utilizan para el sentido de giro del motor y el último se utiliza para dar la velocidad, en la Figura 9 se muestra el diagrama de conexiones interno del robot.

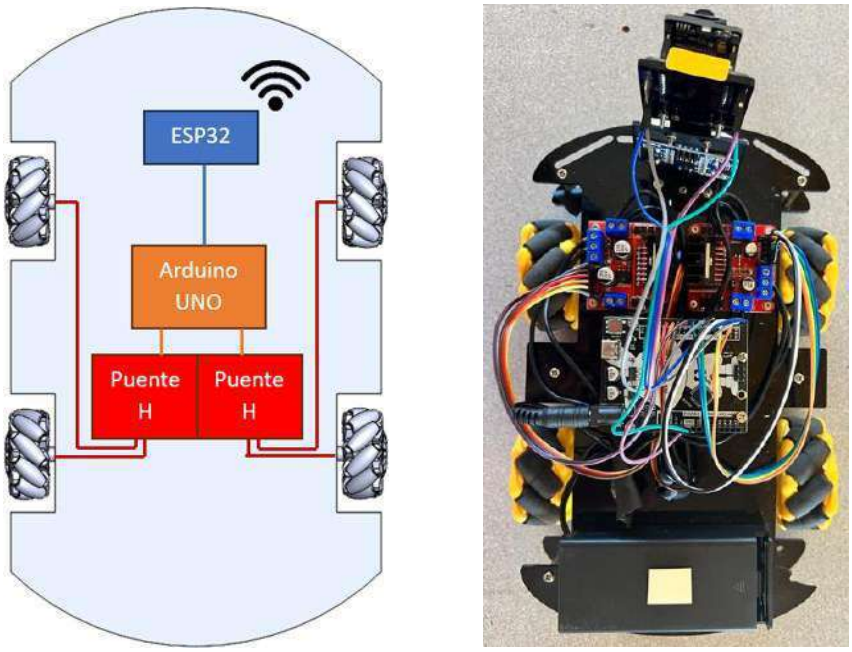


Figura 9. Diagrama de conexiones interno del robot

3.4 Robot móvil omnidireccional

Para realizar la prueba experimental se emplea un robot móvil omnidireccional como el que se muestra en la Figura 10, con la finalidad de probar el seguimiento trayectoria de un usuario, se emplea en un robot móvil omnidireccional educativo ya que son pruebas experimentales y así no dañar a un robot real.

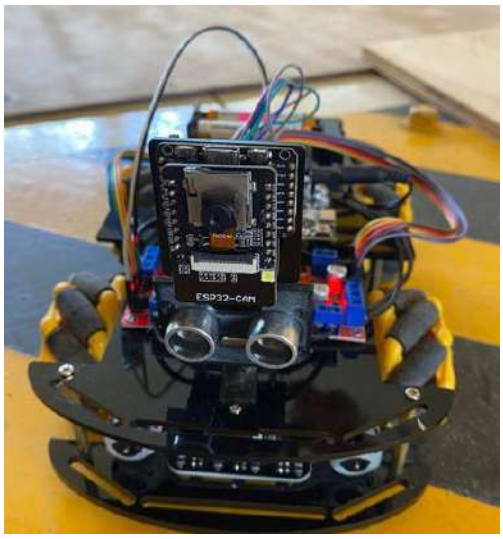


Figura 10. Robot móvil omnidireccional.

3.5 Controlador

El controlador para un robot móvil omnidireccional requiere trabajar directamente con las variables del espacio cartesiano del robot. El control de las ruedas omnidireccionales se realiza mediante algoritmos de control de movimiento que ajustan las velocidades y direcciones de las ruedas para seguir la trayectoria planificada y mantener la posición deseada.

Se implementa un controlador cinemático de lazo cerrado que utiliza como retroalimentación la información obtenida por el sistema de visión, calculando las velocidades de los actuadores en función la diferencia (error) de la posición del robot en tiempo real con la posición deseada (X, Y) y la orientación con respecto al eje Z. En este caso, el centro del robot fue tomado como el punto de control. Haciendo una analogía con los robots manipuladores, este sería el efector final. En la Figura 11 se muestra el diagrama de bloques del controlador cinemático.

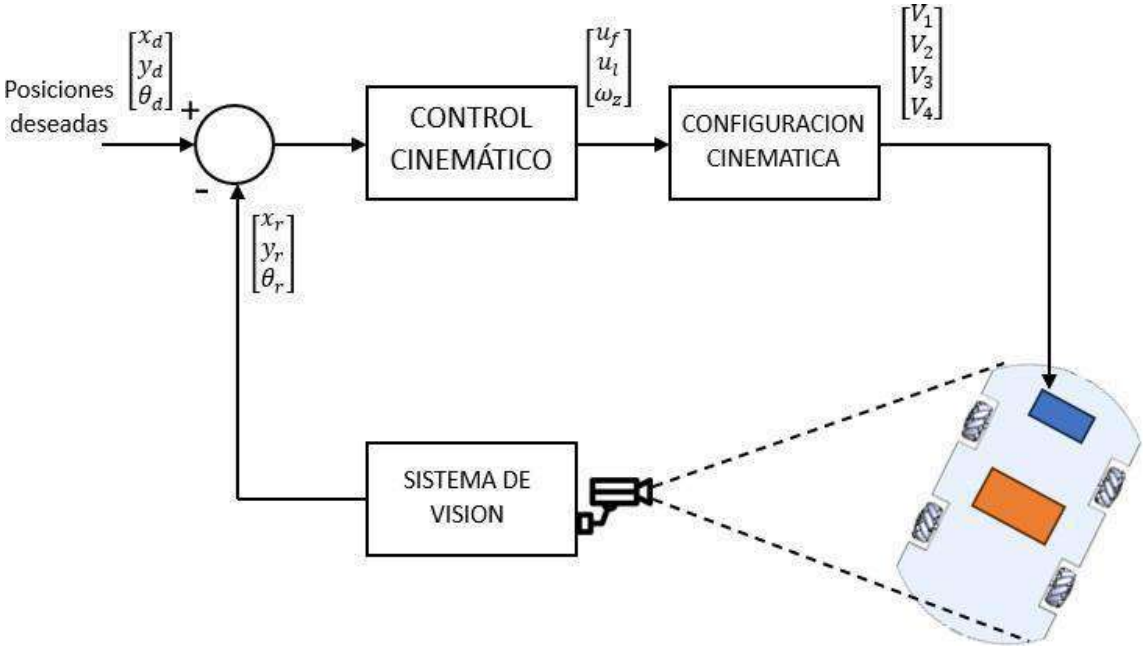


Figura 11. Diagrama de bloques del algoritmo de control

4. Resultados

Para la detección de posición se emplea la librería de Matlab, Color Thresholder, donde se define el color en HSV que se utiliza para detectar la posición en el robot, definiendo además un rango de colores, esto permite que el sistema de visión no sea susceptible a pequeños cambios en la luz, alterando valor HSV obtenido en la cámara. Además, se genera el código en Matlab en forma de función, facilitando la obtención de la posición en pixeles, como se muestra en el programa A.

```
%%%%%%%%%% Programa A %%%%%%%%%%
function [BW, maskedRGBImage] = createMask3(RGB)
% Convert RGB image to chosen color space
I = rgb2hsv(RGB);

% Define thresholds for channel 1 based on histogram settings
channel1Min = 0.077;
channel1Max = 0.156;

% Define thresholds for channel 2 based on histogram settings
channel2Min = 0.367;
channel2Max = 1.000;

% Define thresholds for channel 3 based on histogram settings
channel3Min = 0.687;
channel3Max = 1.000;

% Create mask based on chosen histogram thresholds
```

```
sliderBW = (I(:,:,1) >= channellMin ) 8 (I(:,:,1) <= channellMax) & ...
(1(:,:,2) >= channel2Min ) & (I(:,:,2) <= channel2Max) 8 ...
(T(:,1,3) >= channel3Min ) 8 (I(:,:,3) <= channel3Max); BW
= sliders;
% Initialize output masked image based on input image. maskedRGBImage
= RGB;
% Set background pixels where BW is false to zero.
maskedRGBImage(repmat(~BW, [1 1 3])) = 6;
end
%%%%%%%%%% Fin del Programa A %%%%%%%%%%
```

Una vez que se obtiene la posición en píxeles, se convierten estos valores a centímetros, a través de la matriz del modelado de la cámara, una vez se generan las posiciones en X, Y, y la orientación en el eje Z, se compara con los valores de referencias introducidos, generando las variables de error en X, Y, θ_z, en el programa B se observan las matrices de posición en X, Y, θ_z, tanto deseadas como reales.

```
%%%%%%%%%% Programa B %%%%%%%%%%

%% Control

erx = hd(1) – hr(1); % Error en la posición x
vx = 400 * tanh(erx/20);
ery = hd(2) – hr(2); % Error en la posición y
vy = 400*tanh(ery/20);
era = pi / 2 – angulo; va
= era*15;
m_ang = [cos(angulo) – sin(angulo) 0; sin(angulo) cos(angulo) 0; 0 0 1] % Matriz de angulos V
= inv(m_ang)*[vx;vy;va]:
vel = (j*V)/3;

%%%%%%%%%% Fin del Programa B %%%%%%%%%%
```

Los valores de error se utilizan como entradas del controlador cinemático, el cual proporciona a la salida los vectores de velocidad frontal (uf), velocidad lateral (ul) y velocidad rotacional (ω_z), que se ingresan como entradas de la configuración cinemática del robot, el resultado son las velocidades en cada una de las llantas del robot.

Por último, las velocidades son publicadas en el servidor MQTT, a través de una función que utiliza la librería “MQTT en Matlab”, dicha librería proporciona los métodos necesarios para que sea capaz la conexión entre Matlab y el bróker, en el programa C se observan la implementación en código de las velocidades.

```
%%%%%%%%%% Programa C %%%%%%%%%%

function Publicar_velocidades(vel_superior_izq,vel_superior_der,vel_inferior_izq,vel_inferior_der)
%Create mqtt connection.
myMQTT=mqtt('tcp://192.168.1.103');


%Create topic and message.
topic1='Robot/Velocidad/Rueda/Superior/Izquierda';
topic2='Robot/Velocidad/Rueda/Superior/Derecha';
topic3='Robot/Velocidad/Rueda/Inferior/Izquierda';
topic4='Robot/Velocidad/Rueda/Inferior/Derecha';


vel_superior_izq = vel_superior_izq + "";
vel_superior_der = vel_superior_der + "";
```

```
vel_inferior_izq = vel_inferior_izq + "";
vel_inferior_der = vel_inferior_der + "";

%Publish a message to a topic.
publish(myMQTT,topic1,vel_superior_izq);
publish(myMQTT,topic2,vel_superior_der);
publish(myMQTT,topic3,vel_inferior_izq);
publish(myMQTT,topic4,vel_inferior_der); end

%%%%%%%%%% Fin del Programa C %%%%%%%%%%
```

Para la validación del controlador y los algoritmos de visón se realizan experimentos con el robot omnidireccional, en la Figura 12 se muestra el área de trabajo del robot, el experimento consiste trasladar el robot de la posición inicial del robot a la posición final del robot es la marca rosa en la tabla. El robot móvil tiene dos marcas para determinar la orientación de este, el área de trabajo del robot es la tabla.

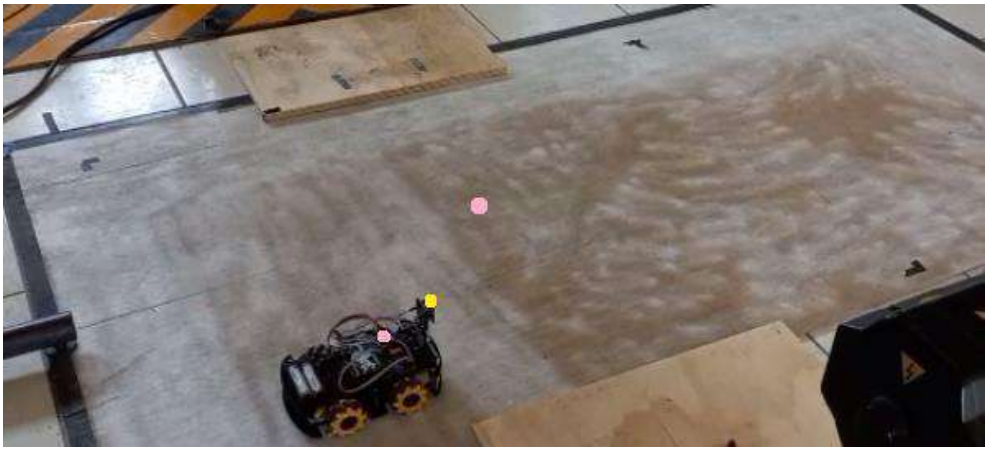


Figura 12. Posición inicial del robot y su área de trabajo.

En la Figura 13, se muestra la posición del robot omnidireccional a mitad del experimento, como se observa el robot tiende a la marca final en rosa. La Figura 14 muestra robot en la posición final, es decir el robot lleva al punto de referencia en un tiempo finito, por lo que garantiza el buen funcionamiento del controlador.

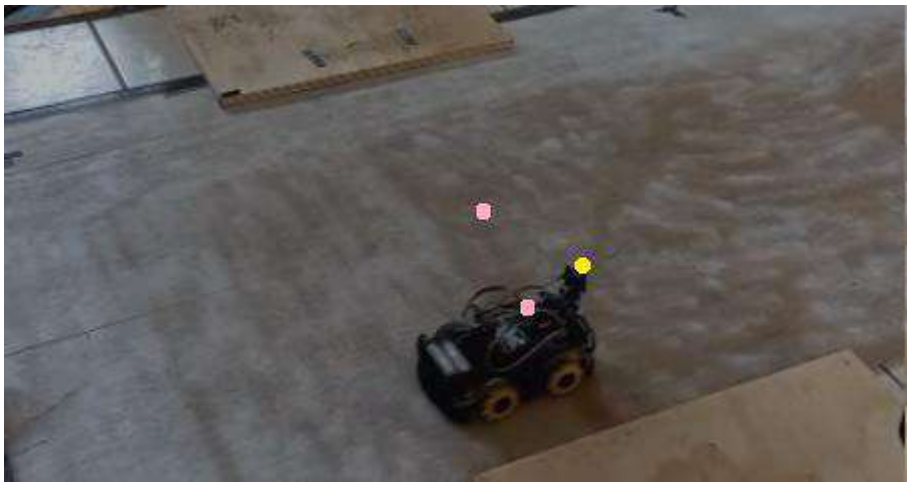


Figura 13. Robot omnidireccional a mitad del experimento.

Figura 14. Resultado del controlador en los ejes x, y

5. Conclusiones

La robótica móvil desempeña un papel cada vez más importante en el campo médico, ya que ofrece numerosas formas de apoyar: asistencia a pacientes, entrega de medicamentos, limpieza, entre otras.

La implementación de un controlador cinemático retroalimentado con visión por computadora es una técnica que tiene resultados satisfactorios en el funcionamiento un robot omnidireccional. La conexión por medio del bróker MQTT es una manera eficaz para enviar al robot las velocidades calculadas en el controlador, sin embargo, es necesaria una buena velocidad en el internet para asegurarse de que no haya retraso en los motores y llegar a las coordenadas deseadas.

Se propone como trabajo futuro la optimización del algoritmo de visión computacional para lograr una implementación con mayor eficiencia, que requiera menor poder computacional y obtenga resultados a mayor velocidad para enviar al controlador y obtener mayor exactitud en el movimiento del robot.

Referencias

[1] Ollero Baturone A., *Robótica, Manipuladores y Robots Móviles*. España, 2005.
[2] Barrientos Sotelo V., García Sánchez J., and Silva Ortigoza R., “Robots Móviles: Evolución y Estado del Arte,” *Polibits*, vol. 35, pp. 12–17, 2007.
[3] Flores Tenza M., “Desarrollo de algoritmos de odometría visual mediante una cámara de 360 grados,” Universidad Miguel Hernández de Elche, 2018.
[4] B. Castillo Otoya, “Control de trayectoria de un robot móvil omnidireccional en un entorno controlado,” Ecuador, 2023.
[5] Amaguaña Moreta E. B., Pilapanta Carrasco K. E., Laica Tulmo B. F, and Ñacato Estrella D. R., “Control de velocidad de motores Brushless aplicado a un robot omnidireccional,” *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, vol. 5, no. 2, pp. 48–64, 2023.
[6] J. Leng, H. Mou, J. Tang, Q. Li, and J. Zhang, “Design, Modeling, and Control of a New Multi-Motion Mobile Robot Based on Spoked Mecanum Wheels,” *Biomimetics*, vol. 8, no. 2, p. 183, Apr. 2023, doi: 10.3390/biomimetics8020183.
[7] Deepak B. B. V. L., Dayal R. Parhi, and Alok Kumar Jha, “Kinematic Model of Wheeled Mobile Robots,” *Int. J. on Recent Trends in Engineering & Technology*, vol. 5, no. 4, 2011.
[8] A. Neaz, S. Lee, and K. Nam, “Design and Implementation of an Integrated Control System for Omnidirectional Mobile Robots in Industrial Logistics,” *Sensors*, vol. 23, no. 6, p. 3184, Mar. 2023,

doi: 10.3390/s23063184.

[9] Zheng Wu J., “Visión computacional para instrumentación y navegación asistida usando métodos opto- digitales,” México, 2020.

[10] Nagane U.P and Mulani A. O., “Moving Object Detection and Tracking Using Matlab,” *Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 1, 2021.

[11] F. Garcia-Lamont, J. Cervantes, A. López, and L. Rodriguez, “Segmentation of images by color features: A survey,” *Neurocomputing*, vol. 292, pp. 1–27, May 2018, doi: 10.1016/j.neucom.2018.01.091.

[12] D. Hema and Dr. S. Kannan, “Interactive Color Image Segmentation using HSV Color Space,” *Science & Technology Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 37–41, Jan. 2019, doi: 10.22232/stj.2019.07.01.05.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 32, pp. 411 - 422
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Metodología para controlar un aeropéndulo desmontablecon un PID

Antonio Jiménez López, Cristian H. Sánchez Saquín*, Alejandro Gómez Hernández,María Guadalupe Contreras Calderón y Mario Eduardo Donjuán Carreño

Universidad Tecnológica de Querétaro, Departamento de Tecnologías de la Información, Av. Pie de laCuesta 2501, Nacional, 76148 Santiago de Querétaro, Qro.* cristian.sanchez@uteq.edu.mx.

Resumen

En este trabajo se presenta una metodología para el control eficiente de un aeropéndulo, haciendo especial énfasis en la estimación de las ganancias de un controlador PID a través de funciones de transferencia y la sintonización utilizando el método de Nichols. Además, se emplea la fabricación de componentes mediante impresión 3D con PLA para crear una estructura ligera y portátil. Se abordantanto la selección como la caracterización de un sensor de retroalimentación crucial para garantizar unarespuesta y control óptimos. También se investiga la optimización de la modulación por ancho de pulso(PWM) con el fin de lograr una respuesta suave y precisa en el sistema. La adquisición de datos se efectuó empleando un dispositivo Arduino, y la transferencia de datosse realizó a través de comunicación serial utilizando VISA, dirigida hacia una interfaz diseñada en LabVIEW. Además de la eficiencia en el control, se destaca la consideración de la portabilidad y la eficiencia energética. El diseño modular del sistema impreso permite su ensamblaje y desmontaje sin sacrificar el rendimiento. La integración de baterías recargables asegura una autonomía operativa sin menoscabo de las prestaciones. En conjunto, los resultados y enfoques presentados en este estudio contribuyen significativamente al campo de control automático y sus aplicaciones prácticas.

Palabras clave: Controlador PID, aeropéndulo, LabVIEW.

1. Introducción

El control efectivo de sistemas mecánicos y dinámicos, inherente a la investigación en el campo de la ingeniería de control automático, ha desempeñado un papel central en el avance tecnológico y científico. Dentro de esta relevante área, el enfoque primordial del presente estudio radica en la aplicación de una metodología para el control de un sistema aeropéndulo. Este enfoque se materializa a través de la meticulosa estimación de las ganancias de un controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) haciendo uso de MATLAB, utilizando como primer método de estimación de ganancias la funciónde transferencia y como segundo método sintonización con Nichols [1]. En consonancia con el propósito esencial de este estudio, se sitúa la manufactura de componentes mediante la técnica de impresión 3Dcon PLA para fabricar piezas que se puedan ensamblar y desmontar para su fácil transporte, esto garantizando que no afecta su comportamiento y no es necesario modificar ganancias o calibrar sensores.

La adquisición de datos se ha llevado a cabo a través del empleo de un dispositivo Arduino, mientras que la transferencia de los datos recolectados se realiza mediante comunicación serial utilizando VISA, en dirección a una interfaz diseñada en LabVIEW. Es importante mencionar que se debe tomar en cuenta el ancho de pulso que se estará controlando porque un ancho de pulso muy grande hará que el sistema sea muy oscilatorio o con sobre impulsos significativos, en contraste, si el ancho de pulso es muy pequeño será un sistema lento.

Para un alumno de ingeniería es importante que los proyectos universitarios no sean voluminosos, costosos y de difícil transporte. Por lo tanto, proponer una planta de control que pueda cumplir con las competencias requeridas para las materias de control, así como también que se pueda entender la parte teórica-práctica de cada unidad, que sea de fácil transporte y fabricación, se torna interesante para que se replique.

Se han realizado trabajos relacionados, en [5] hacen uso de la aplicación de diferentes sistemasde control a un aeropéndulo, una variante de un péndulo simple con un motor incorporado. Los sistemasde control incluyen control PID, asignación de polos por retroalimentación de estados y controlador difuso. Se modeló la dinámica del aeropéndulo y se compararon los resultados de la simulación con el modelo físico para evaluar la eficacia de los controladores y entender sus ventajas y desventajas en diferentes situaciones.

Por otro lado, en [6] presenta el diseño y construcción de un aeropéndulo portátil para uso en laboratorio, utilizando Matlab, Simulink y Arduino. El propósito del proyecto es crear un dispositivo económico y fácil de construir para probar y simular controladores en tiempo real mediante señales de PWM al motor. Se describe el funcionamiento del aeropéndulo y sus componentes, así como la conexión del módulo para un sistema de control en lazo cerrado. Se utiliza Arduino Uno para la adquisición de datos y su conexión con el software Matlab y Simulink.

En [7] se enfoca en tres metas clave: primero, modelar el aeropéndulo y crear una simulación precisa para su comportamiento en lazo abierto, esencial para diseñar y probar controladores. Segundo,se implementa el Filtro de Kalman Extendido para mejorar la estimación de variables del sistema y reducir ruido en las mediciones, comparando su eficacia con mediciones directas. Por último, se diseñany aplican varios controladores utilizando diversas técnicas, como control clásico, basado en variables de estado, integral con modelo de referencia y por linealización exacta, evaluando su desempeño con retroalimentación de variables estimadas. Estos objetivos en conjunto buscan comprender y optimizar el sistema del aeropéndulo y sus estrategias de control.

El trabajo se estructura en tres secciones claramente definidas: la segunda sección se dedica a la descripción de la propuesta del aeropéndulo portátil, detallando sus componentes y elementos esenciales. La tercera sección se centra en la experimentación realizada con el sistema propuesto y presenta los resultados obtenidos. Finalmente, la última sección se dedica a las conclusiones del documento.

2. Diseño

En esta sección del presente trabajo, se abordará el proceso de diseño mecánico de las piezas fabricadas mediante tecnología de impresión 3D, así como el posterior montaje de dichos componentes.El objetivo principal de esta sección es proporcionar una comprensión integral de las etapas involucradas en la concepción, modelado y creación de las piezas impresas en 3D, así como su ensamblaje subsiguiente.

2.1 Diseño de piezas y elementos eléctricos

El sistema del aeropéndulo tiene la finalidad de ser compacto y portátil, para ser fácilmente transportado y ensamblado en diferentes ubicaciones. El peso total del conjunto de las piezas es de aproximadamente 1 kilogramo, Lo que facilita su transporte y movilidad. La ligereza de las piezas fabricadas se logró gracias a la manufactura y ventajas de la tecnología de impresión 3D utilizada y al material seleccionado para su fabricación. En la figura 2.1.0 se observa que la estructura interna de la impresión está con una geometría interna cubica y tiene perímetros externos de 1.6 mm, por lo tanto, el peso total de las piezas se redujo al mínimo conservando estructura y rigidez que aporta a la absorción de impactos.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 32, pp. 411 - 422
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

En la figura 2.1.1 A) se observa el aeropéndulo montado y listo para aplicar control y observar la dinámica del sistema. En B) se observa el sistema desmontado para transportarlo, puede ser fácilmente transportado en una mochila y no corre el riesgo de quebrarse, desarmarse o desconectarse, los cuales son problemas típicos cuando un alumno carga con su maqueta ida y vuelta a la escuela.

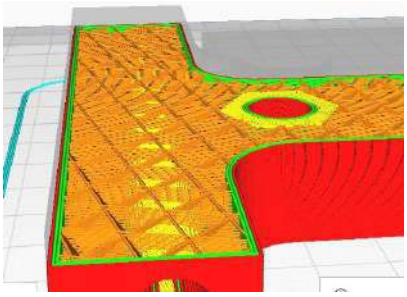
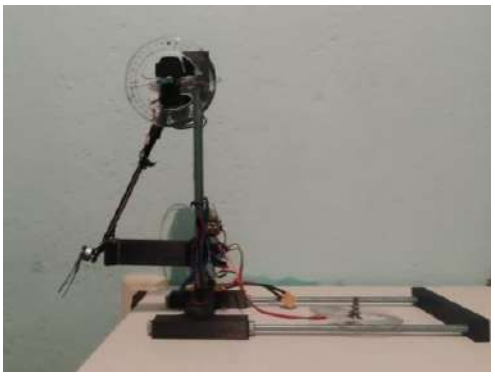
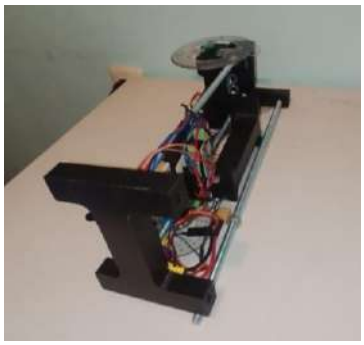


Figura 2.1.0 Estructura interna de los componentes.



A) Aeropéndulo montado



B) Aeropéndulo desmontado

Figura 2.1.1 Sistema aeropéndulo portátil.

2.1.1 Unidad Electrónica y de Control (Pieza Principal)

Esta pieza alberga la electrónica central del aeropéndulo. Incluye una placa electrónica de sofware libre (Arduino Nano), que actúa como el cerebro del sistema y se encarga de la adquisición de datos y el control. También cuenta con un potenciómetro(1Kohm) que actúa como sensor encargado de monitorear la posición y el movimiento del péndulo.

Una perilla de ajuste manual se encuentra en esta unidad para establecer el punto de referencia (set point) deseado. La unidad principal está equipada con un eje de giro que permite el movimiento fluido del péndulo.

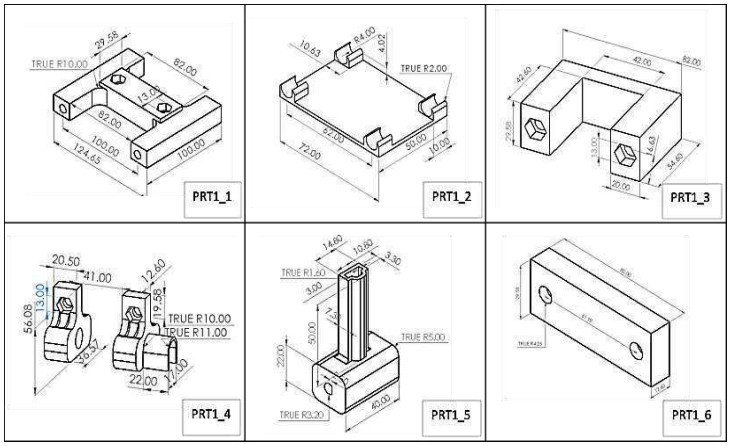
En la figura 2.1.2 A) se muestran el conjunto de 6 piezas que forman el ensamble en B). La figura PRT1_1 es la base del aeropéndulo, las figuras PRT1_2,3,5 y 6 forman la parte superior y PRT1_4 son los soportes laterales del eje perpendicular al eje del motor y también funge como la carcasa del potenciómetro.

2.1.1 Brazo Motorizado con Aspas (Pieza secundaria):

Este componente es responsable de proporcionar la potencia de propulsión al aeropéndulo, véase la figura 2.1.3. Contiene el motor de dron DJI Mini y las aspas. El motor está conectado a través del controlador de motores sin escobillas de 30 amperios. El brazo motorizado se ensamblay

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 32, pp. 411 - 422
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

desmonta de manera segura con la pieza principal a través de PRT1_5.

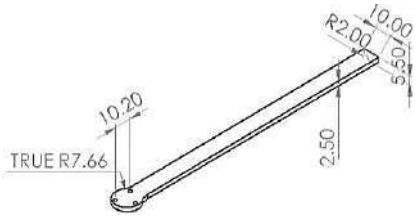


A) Piezas de unidad electrónica de control

B) Ensamble de piezas(color negro)

Figura 2.1.2. Croquis del conjunto electrónica.

A) Pieza impresa



B) Plano de construcción

Figura 2.1.3. Croquis pieza secundaria, conjunto motor/aspas.

2.1.2 Sistema antivuelco del aeropéndulo (Tercera pieza):

Actúa como una base inferior que proporciona estabilidad y evita el vuelco durante el funcionamiento (Véase la figura 2.1.4), esto sucede porque genera un torque opuesto al generado por la masa del motor respecto al centro del ensamble, de esta manera se evita que vibre muchoy que gire en el eje X respecto al centro del ensamble.

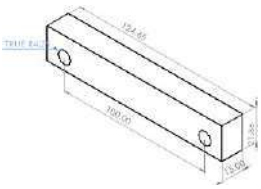


Figura 2.1.4. Croquis Tercera pieza, Base Inferior Antivuelco

2.1.3 Tope Inferior (Cuarta pieza):

La cuarta pieza (figura 2.1.5) funciona como un tope inferior que establece el ángulo inicial del péndulo antes de su funcionamiento, básicamente es su ángulo cero en su posición de reposo. Se ajusta y bloquea en su posición deseada para garantizar que el péndulo comience desde el ángulo correcto.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 32, pp. 411 - 422
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

En la figura 2.1.6 se muestra el ensamble de los 4 subensambes (figuras 2.1.1-4). Como se ha mencionado a lo largo del documento, todas las piezas se pueden desensamblar y ensamblar sin ningúnproblema y también tiene ajustes de altura para el sensor de retroalimentación, posición inicial del péndulo y altura total. Otro punto importante que al ser piezas impresas de PLA y por la forma en cómose imprimieron, no tienen mucho peso, por lo tanto, con un motor de baja potencia se romper la inerciay generar el movimiento angular.

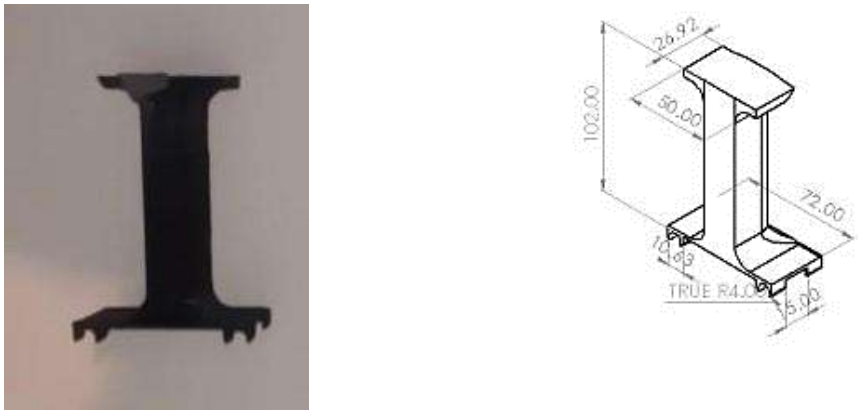
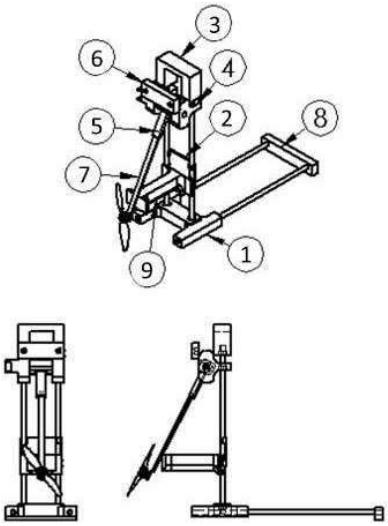


Figura 2.1.5. Croquis Cuarta pieza, Tope inferior.



NO. ITEM	PARTE	DESCRIPCION	CANT.
1	PRT1_1	Base inferior	1
2	PRT1_2	Base electrónica	1
3	PRT1_3	Sujetador Superior	1
4	PRT1_4	Eje	1
5	PRT1_5	Brazo fijo	1
6	PRT1_6	Tope superior	1
7	PRT2_1	Brazo removible	1
8	PRT3_1	Antivuelvo	1
9	PRT4_1	Tope inferior	1

Figura 2.1.6. Ensamble de piezas.

En la tabla 2.1.1 se muestra las especificaciones de los elementos electrónicos usados en la planta.

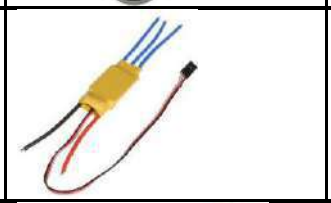
2.2 Sensor de retroalimentación y caracterización

Se empleó un potenciómetro lineal de 1kΩ como sensor de retroalimentación en este sistema. Su funcionamiento se basa en la medición de la resistencia eléctrica en relación con la posición angular del eje. Cuando el potenciómetro se gira, se genera una variación de tensión que el Arduino interpreta como la posición angular correspondiente.

En la figura 2.2.1 se muestra el croquis del potenciómetro, mismo que encaja perfectamente en la figura PRT1_4 de la figura 2.1.1, misma que se usa como carcasa.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 32, pp. 411 - 422
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Tabla 2.1.1 Componentes electrónicos.

Elemento	Imagen	Especificaciones
Motor del drone DJI Mini		Tensión nominal 7V. RPM (Revoluciones por minuto):está en el rango de 5,000 a 10,000 RPM Dimensiones físicas: Las dimensiones del motor son de 20 mm (con las hélices extendidas 120 mm)
Controlador		El controlador de motores sin escobillas utilizado es de 30amperios.
4 Bateria de lítio		La batería de litio 16850 tiene una tensión nominal de 3.7 v (2celdas en serie “2s” 7.4V). Capacidad: 2200 en mAh (miliamperios-hora).
Arduino Nano		Arduino Nano, basado en unmicrocontrolador ATMega,

Características:

Modelo: B1K
Resistencia: 1k Ohm.
Tolerancia: +/-20%Potencia: 0.125W

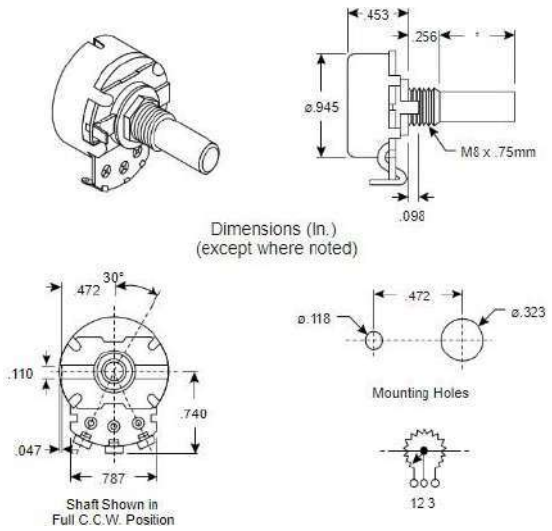


Figura 2.2.1 Croquis potenciómetro.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 32, pp. 411 - 422
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Caracterización:

Se realizaron 24 muestras en incrementos de 5 grados, desde 0° hasta 115° (el cual es el rango de control), registrando la lectura en bits del potenciómetro y el valor real del ángulo correspondiente, mismo que se observa en la tabla 2.2.1.

Tabla 2.2.1. Muestreo de bits a ángulos

NO.	BITS	GRADO
1	428	0
2	444	5
3	466	10
4	487	15
5	504	20
6	523	25
7	543	30
8	563	35
9	580	40
10	601	45
11	636	50
12	648	55
13	660	60
14	681	65
15	701	70
16	722	75
17	742	80
18	760	85
19	778	90
20	797	95
21	814	100
22	839	105
23	859	110
24	878	115

Se estimó una función matemática que relaciona los valores en bits y los ángulos utilizando un enfoque basado en estadísticas y cálculos de regresión. Se utilizó un algoritmo en Python haciendo uso de la librería Scipy para estimar la función lineal que menor error cuadrático medio se acerque a los datos reales.

La función resultante es: $\theta(b) = 0.266142506b - 116.09149645$; dónde $\theta(b)$ estima el ángulo en grados en función de los bits de entrada, enla figura 2.2.2 se observa la comparativa de los datos muestreados con la recta estimada. Se realizó una prueba de la función calculada en un entorno real para verificar su funcionamiento y precisión.

Se encontró que la función tenía un error cuadrático medio (MSE) de aproximadamente 1.5 grados, lo que se considera aceptable para el sistema, dado que al final el controlador se estimará para un error de +- 5% de error del setpoint (6 grados).

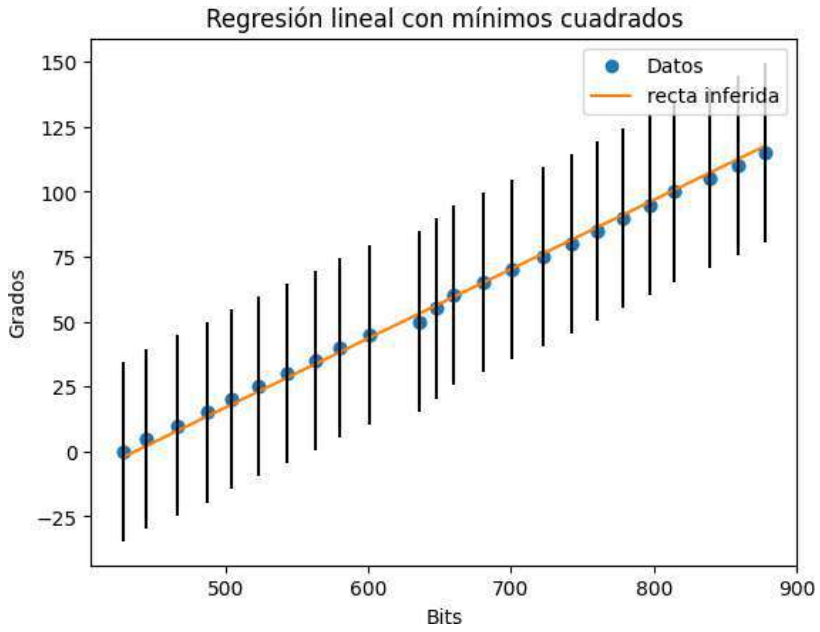


Figura 2.2.2. Datos muestreados en comparación de la estimación de la recta.

2.3 Estimación de la función de transferencia del sistema

2.3.1 Paso escalón:

El sistema se inicializó mediante una señal PWM de 103 en el instante inicial, y con un ciclo de trabajo (Duty Cycle) de 132 una vez que se aplicó el paso escalón, esos valores fueron estimados de forma experimental para tener una respuesta suave. Se configuró la frecuencia de muestreo para obtener mediciones cada 0.02 segundos (20 milisegundos). El proceso de muestreo se llevó a cabo durante un período completo de un segundo, comenzando al mismo tiempo que se inició la excitación de la entrada escalón con un Duty Cycle de 132, lo que resultó en un total de 500 puntos de datos recopilados durante este proceso, véase la figura 2.3.1. Los datos se almacenaron utilizando LabVIEW como herramienta de registro, la cual se encargó de adquirir y registrar de manera continua los datos, asegurándose de guardarlos en un archivo con el formato de texto (.txt).

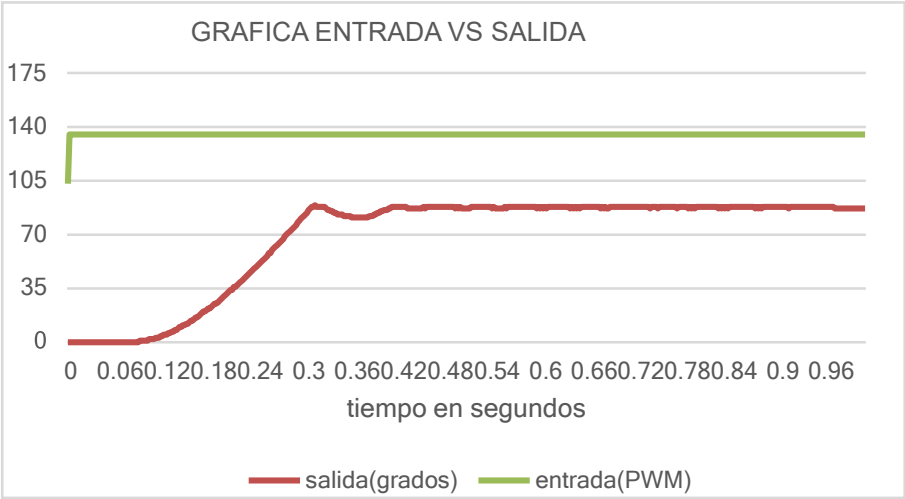


Figura 2.3.1 Gráfica de la respuesta del sistema

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 32, pp. 411 - 422
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

2.3.2 Identificación del sistema.

La identificación de la función de transferencia del sistema dinámico se realizó a partir de datos experimentales a través de una entrada escalón, datos de la figura 2.3.1. Se usó la metodología de reducción de orden [3], esto sabiendo que es un sistema subamortiguado. Para realizar la estimación, se necesitan 2 puntos importantes; $T_{28.4}$ que es el tiempo del 28.4 por ciento de la amplitud máxima y $T_{63.2}$ que es el 63.2 por ciento de la amplitud máxima, tal como se visualiza en la figura 2.3.3. Esto para resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} \theta & \frac{\tau}{3} \\ \theta & \frac{\tau}{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.184s \\ 0.25s \end{bmatrix}$$

Resolvemos el sistema de ecuaciones para obtener:

θ = −0.9, retraso en el tiempo.
r = 0.099, constante de tiempo. Ambas en segundos.

Teniendo en cuenta esto, se estima la función de reducción de orden [3]. Con esta función de transferencia se estiman las ganancias iniciales haciendo uso de la librería PIDTunner de MATLAB.

$$G(s) = \frac{0.66e^{-0.9s}}{0.099s + 1}$$

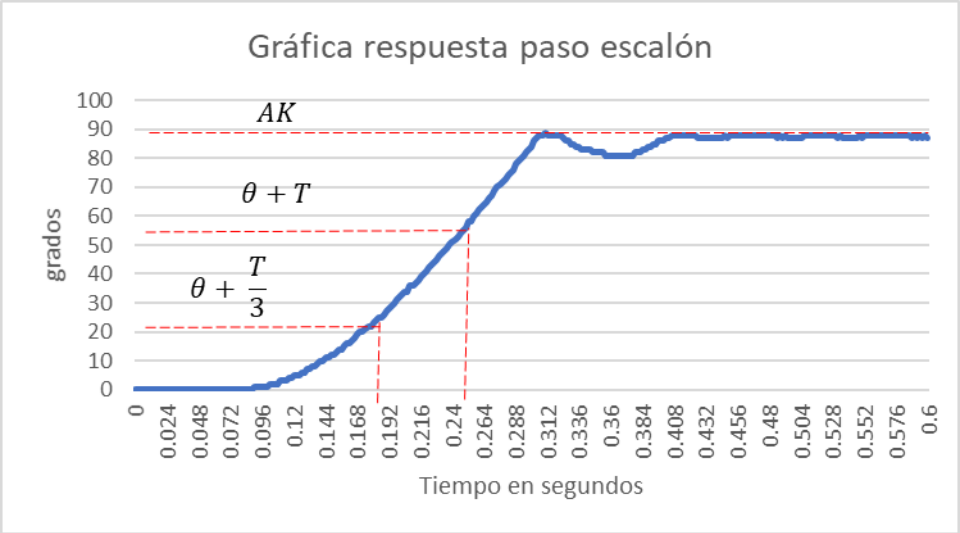


Figura 2.3.3. Estimación por método de reducción de Orden.

2.4 Control mediante método de sintonización de lazo abierto Zingler Nichols

Los valores para realizar la estimación de ganancias se obtuvieron de los datos obtenidos de la respuesta del sistema con el paso escalón como se muestra en la figura 2.4.1. A través de los valores de la ganancia estática k, el tiempo del retardo T1 y el tiempo de asentamiento T2, se pueden estimar los valores de las ganancias [3]:

K=88 T1=0.099T2=0.309

$$Kp = 1.2\frac{T2}{KT1} = \frac{0.309}{88(0.09)} = 0.0425$$

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 32, pp. 411 - 422
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

$$Ti = 2T1 = 2(0.099) = 0.1980$$

$$Td = 0.5\ (T1) = 0.5\ (0.099) = 0.0495$$

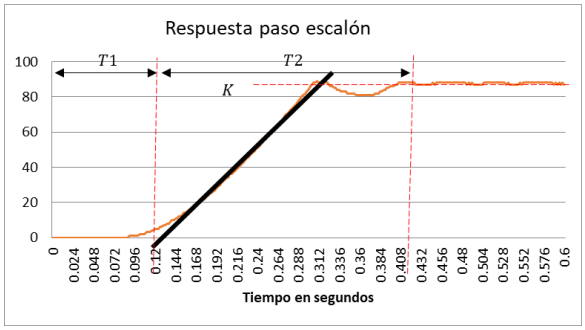


Figura 2.4.1 Representación gráfica del método Zingler Nichols.

Teniendo el valor de las ganancias, se implementaron en el sistema obteniendo una respuesta lenta, sin oscilaciones. Por lo que se hizo un ajuste fino experimental, esto aplicando los conocimientos teóricos aprendidos en clase, teniendo como resultado una respuesta rápida que se mantiene en el set point tolerando perturbaciones, sin oscilaciones y sobre impulso máximos que no rebasan el error del +-5% del valor deseado.

3. Experimentación y resultados

Se utilizó la herramienta de LabVIEW para crear una interfaz de visualización y control para representar de manera gráfica el comportamiento del sistema. Se compararon de forma experimental las ganancias obtenidas en los puntos 2.3 y 2.4, sin embargo las ganancias en 2.4 fueron las que mejor respuesta dieron en cambios del valor deseado y rechazo de perturbaciones. Se hizo uso de un transportador como método de medición para corroborar la respuesta del sistema.

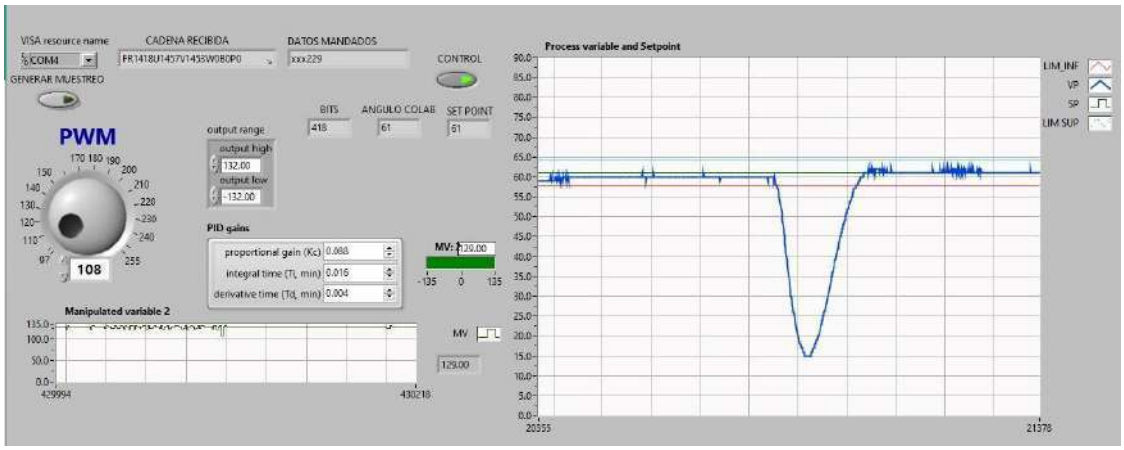
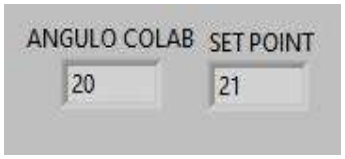
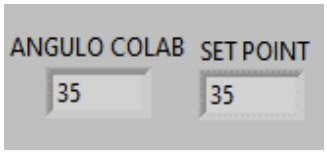
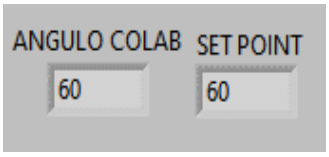
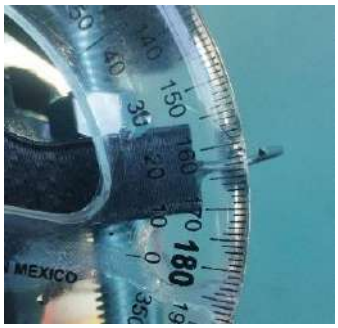
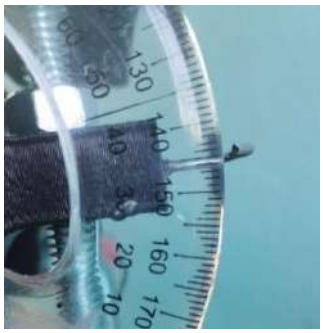
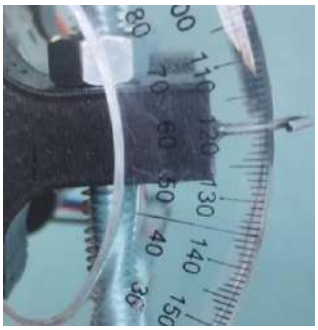


Figura 3.1.1. panel de control y perturbación en el sistema

En la figura 3.1.1 se muestra como el sistema (gráfica azul) se mantiene en el setpoint (línea verde) y dentro del +5% (línea celeste) y -5% (línea roja) de error del valor deseado. Se observa que elsistema se mantiene en 60 grados y el valor deseado es de 61 sin embargo, está bien porque la ecuación del sensor tiene una resolución de +-1.5 grados. Se observa también que después de un tiempo, se ingresa una perturbación que lo desplaza hasta los 15 grados, pero el sistema la rechaza de forma suave y rápida.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 32, pp. 411 - 422
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Tabla 3.1.1 Validación del control

Ángulo	21	35	60
Sistema			
Medición real			

En la Tabla 3.1.1, se presenta una comparativa entre el valor estimado a través de la función caracterizada del potenciómetro (llamado "ángulo colab"), el valor de referencia (setpoint) y la medición real obtenida con un transportador. En los tres ejemplos analizados, se puede apreciar que el error es menor a dos grados al comparar el setpoint con la medición realizada mediante el transportador. Es importante destacar que esta precisión se mantiene constante, independientemente de si el sistema se encuentra armado o desarmado, ya que las mismas ganancias se aplican en ambos casos, manteniendo así los parámetros de error consistentes.

4. Conclusiones

Este estudio ha presentado una metodología sólida para el control eficiente de un aeropéndulo, destacando la estimación de ganancias PID mediante funciones de transferencia y la sintonización mediante el método de Nichols. Además, se enfatiza la fabricación de componentes con impresión 3D para lograr un diseño ligero y portátil, eliminando la necesidad de una conexión a la corriente eléctrica. La consideración de la portabilidad, junto con el diseño modular y la integración de baterías recargables, resaltan la aplicabilidad práctica de este enfoque.

Es importante destacar que, una vez estimadas las ganancias de control, el sistema se comportó de manera consistente, sin necesidad de realizar modificaciones al sistema, al sensor de retroalimentación o a las ganancias, independientemente de si se armaba o desarmaba. Este aspecto subraya la robustez de la metodología propuesta.

Además, este estudio demuestra la aplicabilidad de los conocimientos de control automático para controlar un sistema no lineal de manera efectiva. Se ha comprobado que se pueden obtener buenas estimaciones iniciales de las ganancias ya sea a partir de funciones de transferencia o mediante el método de sintonización descrito anteriormente. En resumen, los enfoques y resultados presentados en este estudio tienen el potencial de ser replicados por otros, lo que contribuye a la difusión y aplicación de estos conocimientos en el campo del control automático y la instrumentación virtual.

Referencias

[1] Åström, K. J., & Hägglund, T. (1995). PID controllers: theory, design, and tuning. Instrument Societyof America.

[2] Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). Additive manufacturing technologies. Springer.
[3] Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Pearson Educación.
[4] Karl Johan Astrom y Richard M. Murray. (2009) Feedback systems, An Introduction for Scientistsand Engineers. Princeton University Press.
[5] CASTILLO, Gregorio, GOMEZ, Elda, GONZAGA, Elisa y REYES, Iván. Sintonización y comparación de controladores para un aeropéndulo. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2017. 1-3:16-26.
[6] Lucero Alvarado Hernández. (2015). Modelado y construcción de un aeropéndulo. Huauchango, puebla.
[7] Etchepareborda Andrés, Paesani Matías y Sosa Visconti Ariel. (2016). Modelado, identificación y control del sistema aeropéndulo. Universidad Nacional de La Pampa Facultad de Ingeniería.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 33, pp. 423 – 436
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Sistema automatizado de malla sombra para hortalizas

Kenji Davián Chávez Cruz, Cristian Hamilton Sánchez Saquín*, Alejandro Gomez Hernández, Tania J. Ortiz Ortiz y Jesus H. Pérez Vázquez

Universidad Tecnológica de Querétaro, Departamento de Tecnologías de la Información, Av. Pie de laCuesta 2501, Nacional, 76148 Santiago de Querétaro, Qro. cristian.sanchez@uteq.edu.mx*.

Resumen

Los factores medioambientales como la radiación solar, temperatura y lluvia incidente en las primeras etapas de vida de los frutales y hortalizas, tienen un gran impacto para el correcto o nulo desarrollo y producción de estas plantas en su etapa adulta, por lo que, con el objetivo de tener un mejor control de estos factores externos, se desarrolla un programa en el software de LabVIEW y se implementa un sistema de cierre automático de malla sombra, que mediante un detector de OCR, haciendo uso de la librería de Vision Assistant, lee e interpreta los códigos impresos para 10 distintos tipos de hortalizas. Los códigos asociados para cada una de estas hortalizas permiten asignar un límite de temperatura ideal a la cual deba cerrarse la malla sombra, además de esto, se incluye una condición general para que, en caso de que exista una precipitación pluvial superior a 1.5 mm de agua, se lleve a cabo una rutina de cierre. El programa genera un reporte de datos en un archivo CSV donde se muestra el código de hortaliza detectada, setpoint de temperatura asignado, datos de temperatura, precipitación pluvial, así como la hora y fecha. Con este sistema se pretende mejorar las condiciones bajo las que se desarrollan las hortalizas, buscando aprovechar la mayor cantidad de horas de sol sin llegar a deshidratarlas y brindándoles protección de las altas temperaturas y lluvias torrenciales.

Palabras clave: OCR, temperatura, precipitación pluvial, hortalizas.

1. Introducción

El cultivo de plantas frutales y hortalizas ha sido por mucho, una de las actividades más antiguas que transformaron la forma de vida y alimentación de la humanidad [1]. Sin embargo, el aumento de la población mundial, los efectos del cambio climático y la pérdida de suelo fértil, han provocado que el ser humano invierta en tecnología agrícola [2], pues la demanda de este tipo de productos de índole agroalimentaria va en crecimiento [3], lo que incita a cultivar alimentos fuera de temporada, inclusive con climas que no son óptimos para el correcto desarrollo de las plantas. Uno de los mayores problemas, no importando en qué temporada o estación se realice el cultivo, es el inminente aumento de temperatura, pues según datos del gobierno de México, los diversos modelos coinciden que la temperatura en México para el año 2100 aumentará 4ºC en la zona fronteriza con Estados Unidos de América, y se estima que el resto del país aumentará entre 2.5 y 3.5 ºC [4].

Las altas temperaturas generan cambios anatómicos, morfológicos y funcionales en las plantas, algunos similares a los producidos por el estrés hídrico, tales como: reducción del tamaño de las células, reducida conductancia estomática y cierre de los estomas, cambios en la permeabilidad delas membranas, incrementos de la densidad de estomas y tricomas, y vasos del xilema de mayor tamaño. Los efectos acumulativos de estos cambios usualmente resultan en un pobre crecimiento y reducida productividad de los cultivos [5].

Otro de los efectos derivados del cambio climático es el aumento de tormentas. A medida que se elevan las temperaturas se evapora mayor humedad, lo que causa inundaciones y precipitaciones extremas, provocando más tormentas destructivas [6]. Un exceso de agua en la superficie sobre las

que están sembradas las plantas puede provocar pudrición de la raíz y corona por phytophthora en árboles, tomate y chile [7], deficiencias nutrimentales en maíz [8], así como disminución en la firmeza, contenido de azúcares, además de promover condiciones más favorables para las lesiones mecánicas en fresas [9]. Además de ocasionar este tipo de problemas por exceso de humedad sobre el suelo, existe riesgo de daños físicos por lluvias sobre las plantaciones [10], y, en casos más extremos como granizo, se pueden producir daños bien marcados, pérdidas de área foliar fotosintéticamente activa, daño y quebrado de tallos, teniendo como consecuencia disminuciones en el rendimiento del cultivo establecido [11].

Derivado de estos problemas, se han implementado distintos métodos de cultivo que buscan proteger las plantaciones para así asegurar la cosecha y evitar pérdidas monetarias. Algunos de ellos, con técnicas más tradicionales mediante uso de carpas, invernaderos, malla sombras y siembra a campo abierto, mientras que existen otros que controlan las variables de humedad, temperatura, radiación solar, aireación y luminosidad mediante el uso de sistemas automatizados.

Algunos sistemas como el de Hahn [12] propone un sistema de apertura y cierre automático de malla sombra en la parte superior y cortinas laterales, controlado mediante sensores de iluminación LI210SL, LI-COR inc para medir la radiación y termopares tipo J para medir la temperatura del aire en un cultivo de tomate Roma, realizando mediciones cada 10 minutos para posteriormente ser almacenadas en un registrador.

Romantchik Kriuchkova et al [13] propone un sistema de control automático de apertura y cierre de malla sombra para un cultivo de fresas, usando como controlador, un PLC Milenium III, un sensor de luz LDR A106-300 con un rango de medición de 1-3 000 lux y 2 sensores de posición para detectar la apertura o cierre de la malla sombra. Para poder utilizar el sensor de luz como un sensorde radiación, se desarrollaron filtros para el mismo, añadiendo ganancias en el PLC para así determinar rangos mínimos y máximos, para finalmente, mediante un luxómetro PCE-LED realizar la calibración del sensor, con lo que la apertura y cierre de malla sombra se da entre rangos de radiaciónsolar en vatios por metro cuadrado (W/m^2).

En este documento se presenta un sistema automatizado de cierre de mallas de sombra utilizando LabVIEW como controlador, la librería "Vission Assistant" para detectar códigos OCR de temperaturas óptimas para diversas hortalizas, y la tarjeta Arduino UNO para adquisición de datos. El sistema, programado con LabVIEW y "Vission Assistant", interpreta códigos OCR para ajustar el cierre de la malla según límites de temperatura específicos para cada planta, mientras un sensor LM35 monitorea la temperatura ambiente. Además, se incorpora una función de cierre automático ante lluvias, protegiendo las plantas. El programa genera un informe .CSV con detalles de códigos OCR, puntos de temperatura, temperaturas registradas, precipitación y fechas correspondientes.

2. Propuesta del prototipo

La propuesta consta de un sistema automatizado de cierre de malla sombra, haciendo uso del software de LabVIEW como controlador, panel de control para el usuario y la librería “Vission Assistant” como detector códigos OCR con la información contenida de la variable óptima de temperatura para 10 distintas hortalizas, así como la tarjeta Arduino UNO como tarjeta de adquisición de datos.

Al sistema, dentro de la programación de LabVIEW y con la ayuda de la librería de “Vission Asisstant”, se le entrenó para la lectura e interpretación de 10 códigos mediante OCR (Optical Character Recognition, por sus siglas en inglés). Dichos códigos almacenan la información de un límite de temperatura específico para cada una de las hortalizas, a la cual deba cerrarse la malla, permitiendo que, mientras no se supere dicho límite, esta no se cierre y la hortaliza en cuestión, pueda llevar a cabo su proceso fotosintético sin ninguna barrera. Para llevar a cabo la captura de la temperatura ambiente, se utilizó un sensor LM35 con un muestreo cada 30 segundos.

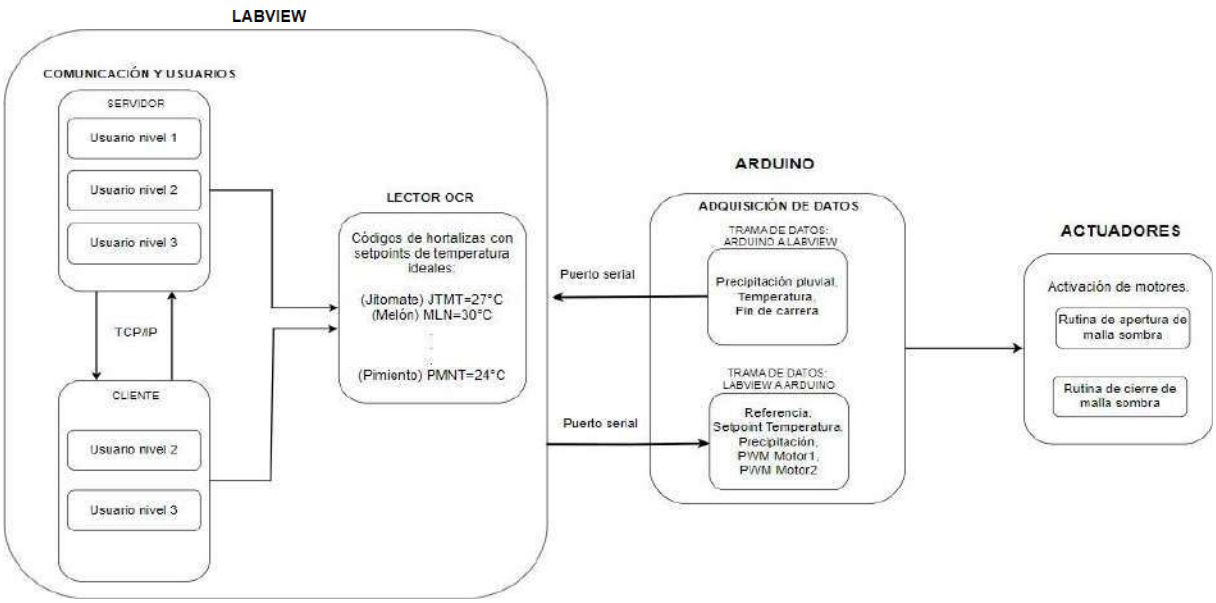


Figura 1. Diagrama de bloques de funciones LabVIEW-Arduino

En adición a ello, se integra una condición general de cierre automático para la malla sombra, en la cual, si se detectan condiciones de precipitación pluvial, esta actuará, cubriendo los cultivos de intensas lluvias y granizo, puesto que ahora la misma malla sombra fungirá como barrera, evitando que las gotas de lluvia y el granizo caigan de forma directa a las plantas, lastimando así su área foliar, tallos o incluso la pérdida total de la planta en sus primeras etapas de vida.

El programa a su vez permite generar un reporte de datos con extensión CSV donde otorga información como: código OCR capturado, setpoint de temperatura asignado, temperatura y precipitación con la respectiva fecha y hora en que fue detectado ya sea un código, aumento de temperatura o detección de precipitación pluvial.

2.1 Adquisición de datos

Haciendo uso de la tarjeta de programación Arduino UNO, se pudo llevar a cabo la adquisición de las variables de temperatura y precipitación pluvial mediante los sensores analógicos LM35 y el módulo YL-38, respectivamente. Además, como sensor de fin de carrera, se utilizó un optointerruptor NPN que indicaría cuando la malla sombra se encuentre cerrada.

La temperatura fue adquirida mediante el sensor LM35 en su configuración básica, que le permite tener un rango de operación desde los 2°C hasta los 150°C, entregando una salida lineal de 10mV/°C. Al entregar una salida de tipo analógica esta se conectó directamente a la entrada A4 de Arduino, quien realiza la conversión ADC y envía el respectivo valor de 0-1023 que posteriormente LabVIEW convertirá a °C.

La precipitación pluvial que incide sobre el área circundante donde se encuentran las hortalizas, es adquirida mediante el módulo sensor de lluvia YL-38 en su configuración como sensor analógico, el cual presenta una placa con un área de sensado de 16.8 m^2 con pistas no unidas entre sí, las cuales, al caer una o varias gotas de lluvia, cerraran el circuito provocando una caída de tensión, la cual es proporcional al porcentaje de área húmeda de esta placa. La señal de salida se encuentra entre 1V para un área de la placa húmeda y 5V para el área de la placa sin humedad. Al elegir esta configuración analógica, se conectó a la entrada A0 de Arduino, quien realiza la conversión ADC y envía el respectivo valor de 0-1023 que posteriormente en LabVIEW se convertirá a $ml\ \ cm^2$.

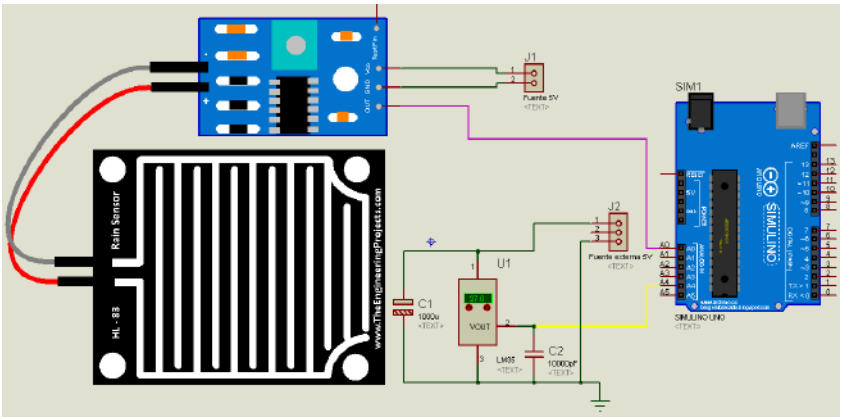


Figura 2. Diagrama de conexiones LM35 y módulo YL-38

Para detectar que la malla sombra se encuentra cerrada, se utilizó un optointerruptor tipo ITR-9606 DIP-4, que por su diseño puede actuar también como encoder, el cual permite que, al introducir un objeto entre la ranura donde se encuentra el led infrarrojo y el fototransistor, se interrumpa la señal óptica, provocando que, si se coloca un pin digital (8) de entrada al Arduino, detecte estados lógicos 1/0.

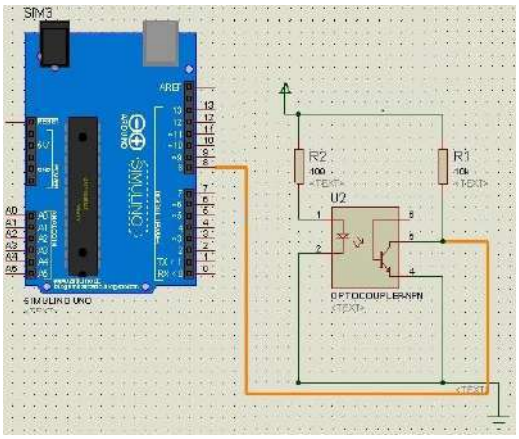


Figura 3. Diagrama de conexiones optointerruptor (fin de carrera).

Finalmente, como etapa de potencia y actuadores, se tiene un circuito integrado L293D, el cual se trata de un puente H que puede controlar 2 motores de manera independiente, así como modificar su velocidad mediante entradas PWM.

El prototipo permite cubrir un área de 42 x 30 cm con la malla sombra, por lo que los actuadores son 2 motores DC de 12V, 1 de ellos con un acoplamiento que permite enrollar la malla sombra para recogerla, mientras que el otro, mediante una correa de transmisión y una pieza móvil acoplada a ella permite extenderla en su totalidad, para obtener un mejor manejo de la sombra, ambos actúan a lavez para apertura y cierre, sin embargo, la velocidad y el tiempo de activación son distintos.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 33, pp. 423 – 436
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

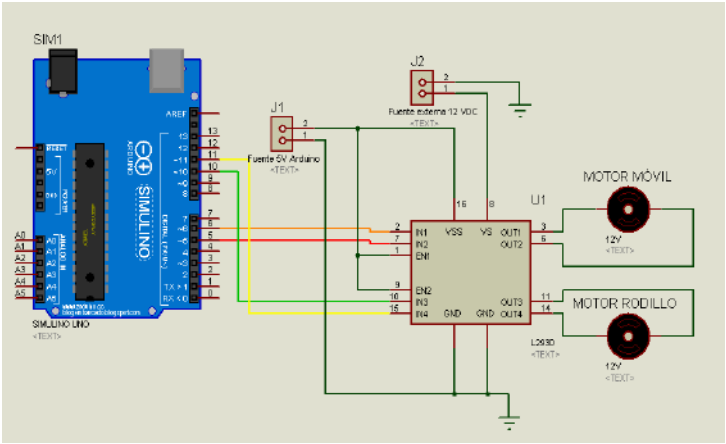


Figura 4. Diagrama de conexiones Puente H y motores.

2.2 Sistema de visión

La configuración realizada para el sistema de visión, se llevó a cabo con la ayuda de la librería de Vision Acquisition y Vission Asisstant. La primera de ellas ayuda a configurar/elegir el tipo de cámara FPS, pre-procesamiento de la imagen o la disposición de controles para el procesamiento continuo de las imágenes mientras corre el programa.

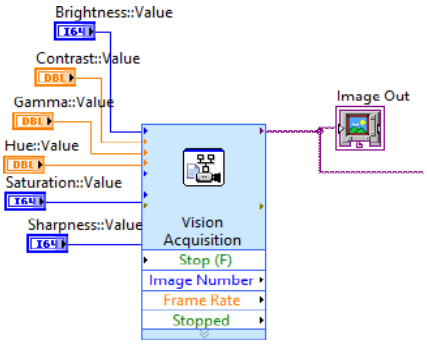


Figura 5. Controles para procesamiento de la imagen en Vision Acquisition.

Para entrenar el reconocimiento OCR, se creó un documento que incluye al menos 8 repeticiones de todas las letras del abecedario o las letras de interés. Esto permite verificar ladetección y realizar correcciones si es necesario. Es esencial que la fuente y el tamaño de letra en el documento sean lo más parecidos posible a las letras utilizadas en las etiquetas de código OCR.

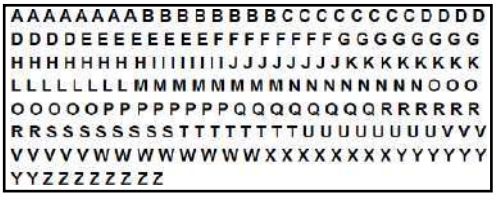


Figura 6. Plantilla para entrenador de caracter.

Se elige esta captura de pantalla a escala 1:1 para ingresarla en "Vision Assistant". A diferencia de una hoja impresa, no necesita manipulación, corrección de posición o ajuste de brillo. Esto facilita

que la computadora reconozca el patrón, forma y estilo de las letras con precisión.

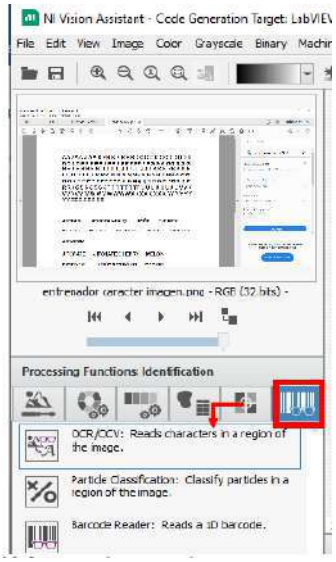


Figura 7. Ubicación de opción para lector de OCR

El entrenamiento se realizó con la opción “OCR/OCV: Reads characters in a región of the image” que se encuentra dentro del menú de “Funciones de procesamiento: Identificación” en Vission Assistant. Y dentro de esta opción el entrenamiento fue de caracter por caracter, de manera manual, conel objetivo de asegurar una correcta interpretación de las letras que forman parte de los códigos para cada hortaliza.

2.3 Control de cierre y apertura

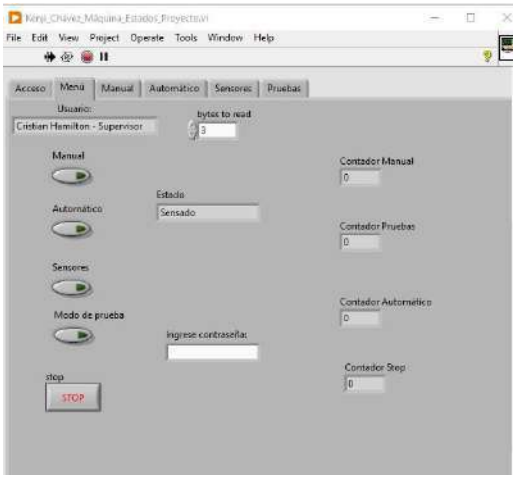
Las señales adquiridas por el módulo sensor de lluvia son una condición general para cualquier hortaliza, mientras que el setpoint/límite de temperatura específico para cada una de las plantas, es asignado mediante la lectura e interpretación del código OCR asignado a cada maceta. LabVIEW compara este valor con la temperatura ambiente en tiempo real y, en caso de ser superado, la malla sombra cerrará y permanecerá de este modo hasta que la temperatura ambiente vuelva a estar por debajo de este límite. En la siguiente tabla se mostrarán los posibles casos que se pueden presentar, la acción que sería tomada para cada uno de ellos, así como las hortalizas, los códigos asignados a cada una de ellas y sus respectivos límites de temperatura:

Tabla 1. Posibles casos para apertura/cierre de malla sombra y nomenclatura hortalizas

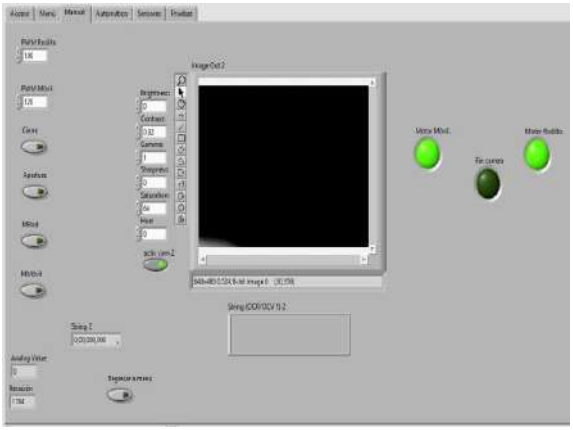
Caso	Sensor LM35	Sensor YL-38	Sensorfin de carrera	Acción	Hortaliza	Código asignado	Setpoint temperatura
1	NA (Sin setpoint asignado)	Precipitación >=1.5 mm agua	LOW	Cierre	Jitomate Jitomate Cherry	JTMT JTMTCH	27°C
2	NA (Sin setpoint asignado)	Precipitación <1.5 mm agua	HIGH	Apertura	Pimiento	PMNT	24°C
3	Setpoint > Temperatura	Precipitación <1.5 mm agua	HIGH	Apertura	Serrano	SRRN	26°C
4	Setpoint > Temperatura	Precipitación >=1.5 mm agua	LOW	Cierre	Melón, Calabacín Calabaza	MLN CLBCN CLBZ	30°C
5	Setpoint < Temperatura	Precipitación <1.5 mm agua	LOW	Cierre	Sandía	SND	28°C
6	Setpoint < Temperatura	Precipitación >=1.5 mm agua	LOW	Cierre	Pepino	PPN	29°C

2.4 Interfaz con usuario

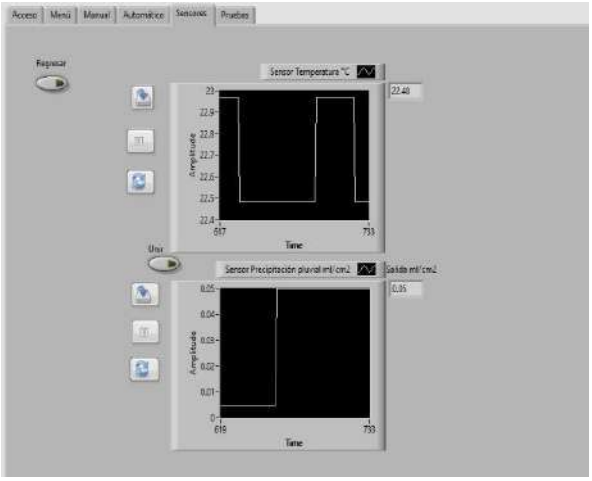
El programa cuenta con una interfaz de acceso que requiere llenar 2 campos específicos: Nombre y contraseña. Permitiendo únicamente el manejo del programa a usuarios registrados y cada uno con acceso limitado a las características según su jerarquía.



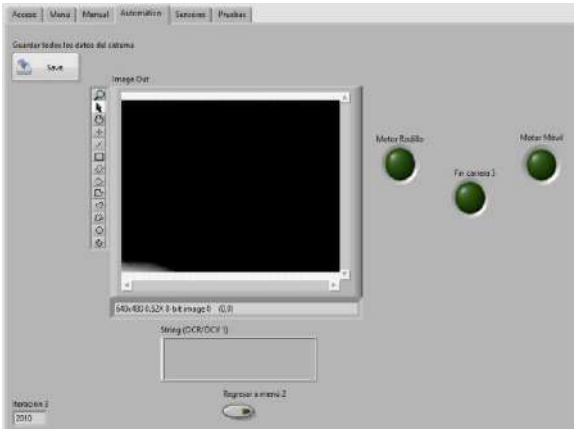
a) Panel frontal modos de trabajo.



b) Panel frontal Modo Manual



c) Panel frontal Visualización sensores



d) Panel frontal Modo Automático

Figura 8. Panel frontal de las secciones del programa.

En la figura a), se muestran botones con distintos modos de trabajo, opciones de usuario o cargo, y un indicador en el centro que muestra el estado actual del programa en ejecución. Además, se incluye una casilla de texto que solicita la contraseña. Esta casilla se usa para acceder al modo manual en caso de usuarios seleccionados o para finalizar el programa.

La figura b) muestra controles para el modo manual, incluyendo controles numéricos para la velocidad de los motores, un ajuste PWM que es inamovible en el área de automático, botones para activar motores y rutinas de apertura y cierre, sección de cámara con botón de encendido/apagado, ajustes de procesamiento y, a la derecha, indicadores de motores y sensor de fin de carrera.

La figura c) muestra la sección compartida de "sensores" para modos manual/automático, donde se presentan gráficas en tiempo real de temperatura y precipitación pluvial. Incluye botones para guardar datos de sensores, detener muestreo, limpiar la pantalla y combinar gráficas.

La figura d) muestra la sección de modo automático con un botón para guardar todos los datos de sensores, códigos, setpoints, etc. En el centro, hay un cuadro de cámara que captura códigos OCR y un indicador de texto que muestra lo que interpreta el lector. Cuando se detecta un código válido, muestra el setpoint de temperatura asignado a la planta. A un lado, hay indicadores LED que muestran qué motor está en funcionamiento y si el sensor de fin de carrera está activo.

2.5 Comunicación TCP/IP

El programa cuenta además con la característica de poder realizar una comunicación mediante el protocolo TCP/IP, lo cual permite al “Cliente” realizar acciones de selección de modos de trabajo (con los respectivos controles que le habilita el iniciar sesión en el “Servidor”). En el “Cliente” la única característica que comparten todos los usuarios registrados, es el monitoreo y visualización de las variables sensadas, así como los indicadores de activación de cada actuador.

Tabla 2: Niveles de usuarios y controles disponibles.

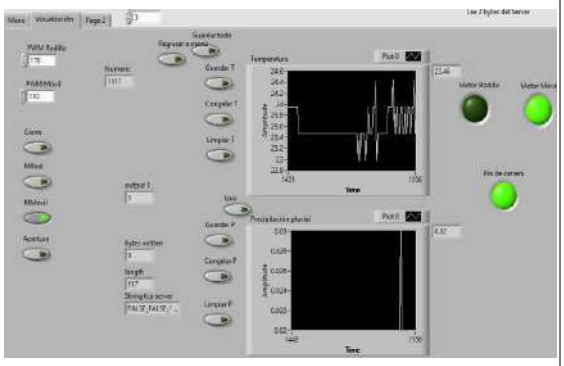
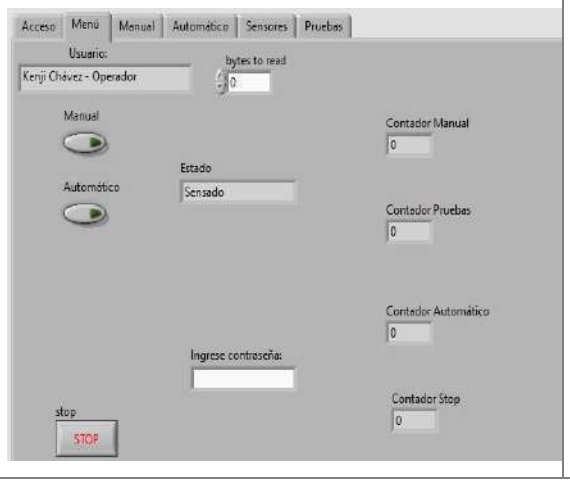
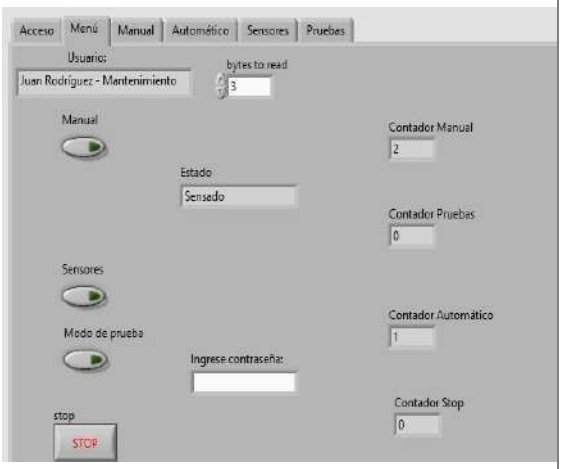
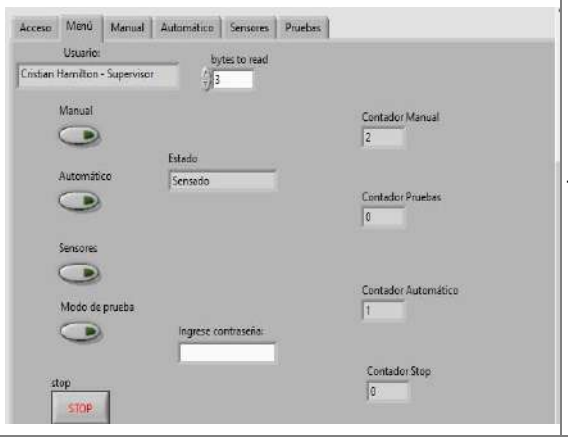
Tipo de usuario	Modo de trabajo/sección	Panel frontal	Características/controles disponibles
Supervisor Mantenimiento	Manual (Programa cliente)		-Controles para asignación de PWM. -Botones de activación independiente de motores. -Botones de rutinas Apertura/Cierre. - Botones monitoreo y visualización gráficas de sensores.
Operador	Menú modos trabajo (Programa servidor y cliente)		-Controles de: Modo Manual (Protegido con contraseña) y Modo Automático. -Control de detener el programa (Protegido con contraseña). -Text Box para ingreso de contraseña. -Visualización sensores sin controles de monitoreo.

Tabla 2 (cont.) Niveles de usuarios y controles disponibles.

Tipo de usuario	Modo de trabajo/sección	Panel frontal	Características/controles disponibles
Mantenimiento	Menú modos trabajo (Programa servidor y cliente)		- Controles de: Modo Manual, Sensores y Modo Prueba. - Control de detener el programa. (Protegido con contraseña) - Controles de guardado de datos y monitoreo de gráficas(Sensores)
Supervisor	Menú modos trabajo (Programa servidor y cliente)		- Controles de: Modo Manual, Automático, Sensores y Prueba. - Control de parar elprograma -Controles de guardado de datos y monitoreo a gráficas de sensores. -Controles de activación independientes en modo manual.

3. Pruebas

Para corroborar el funcionamiento del prototipo, se realizó la prueba de la detección y asignación de un límite de temperatura de 24°C ideal para una maceta de pimientos, para lograr esto, se posicionó el código de la maceta frente a la cámara, como se muestra en la figura 9.

Como se puede observar, la prueba fue realizada un día soleado, que, según datos del clima, había temperatura ambiente de 29°C, con lo cual, se activaría inmediatamente una rutina de cierre de la malla sombra, activando los 2 motores e indicando su estado mediante sus correspondientes ledsindicadores.

En la figura 10a) y 10b) se observa la detección de los códigos OCR para las hortalizas de jitomate Cherry y chile serrano respectivamente, junto con el mensaje que indica el setpoint que se le asigna alprograma para que la malla sombra cierre en caso de ser superado.

Figura 9. Prueba 1. Detección de código de pimiento.

a) Detección, lectura de código y asignación de setpoint para jitomate cherry

b) Detección, lectura de código y asignación de setpoint para chile serrano.

Figura 10. Pruebas de detección de códigos y asignación de límite de temperatura

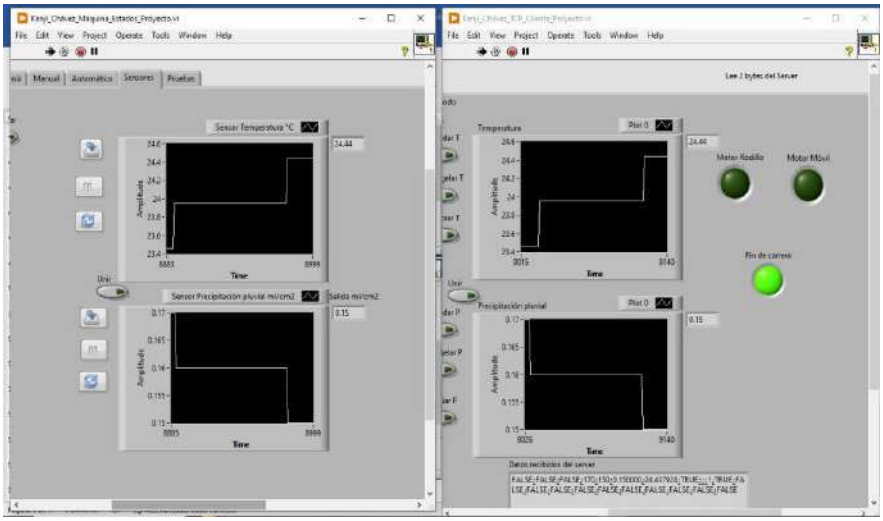


Figura 11. Panel frontal Visualización de sensores (Servidor) / (Cliente)

Previo a capturar esta última imagen, se le dejaron caer aproximadamente 3 gotas de agua alrededor del sensor, lo que equivaldría a aproximadamente 2.5 ml de agua, con lo cual hubo una activación de los motores y culminó cuando, como se puede observar, se detectó el fin de carrera.

Como se puede observar, las unidades de medida que presenta la gráfica y el display está en $ml\ \ cm^2$ y en decimales, sin embargo, este mismo dato presentado, sería igual a una lluvia de 1.5$ml\ /m^2$ o una lluvia de 1.5 mm. Dejando en claro que este valor representaría la precipitación pluvial que habría en el ambiente, más no la cantidad de agua presente en la placa del módulo sensor. Suponiendo que la lluvia se repartiera de forma equitativa alrededor de 1m^2, al área del sensor de 0.00168m^2 le caerían aproximadamente 2.5 ml de agua, es decir, se presenta como una condición de aproximación, sin embargo, en una lluvia intensa o tormenta, la cantidad de agua que habría sobre el sensor sería demasiada y se impactaría tan rápido, tantas veces, que el sensor detectaría condicionessuperiores, generando que se cierre inmediatamente.

Se pretende probar el prototipo con todas las hortalizas durante 4 meses para verificar y hacer una comparación entre estos mismos cultivos a cielo abierto y con el sistema de malla sombra. Observando la cantidad de frutos producidos y cosechados, cantidad de flores polinizadas con éxito y tamaño de las plantas.

Figura 12. Vista 1 sistema físico implementado y actuadores

En la figura 12, se puede observar una fotografía del sistema manufacturado a base de perfil de acero, se observa a su vez, la disposición de los 2 motores DC que llevan a cabo la apertura y cierre de la malla sombra y, en la parte central de la imagen, la posición del sensor de lluvia YL-38.

En la figura 13, se puede observar de manera más detallada, el área sobre la cual correría la malla sombra, en este caso, cubriendo una planta de calabacín. Del lado derecho, se aprecia la transmisión por correa, cuyo actuador es el denominado “motor móvil”.

En la siguiente tabla comparativa se concentran las principales características de cada uno de los sistemas similares de control de malla sombra mencionados en la introducción, frente a las del sistema propuesto y desarrollado a lo largo del presente documento.

Figura 13. Vista 2 sistema físico implementado y área de protección

Tabla 3: Tabla comparativa de sistemas similares.

Características	Sistema malla sombra propuesto	Sistema malla sombra (Hahn)	Sistema malla sombra (Romantchik Kriuchkova et al)
Controlador	Arduino UNO-LabVIEW	Sin información/Electrónica analógica (irrigación)	PLC Milenium III XD26
Variables consideradas	Temperatura/Precipitación pluvial	Radiación solar/Temperatura del aire/Irrigación	Radiación solar/Riego
Sensores	Sensor de temperatura LM35 / Sensor de lluviaYL-38	Sensor de iluminación LI210SL, LI-COR inc / Termopares tipo J/ celda solar (mod LGPHOTO) o fototransistor (mod PN107F	Sensor de luz LDR A106-300
Actuadores	Motores C-9000 de 12 VDC	Sin información	Motor ERU-B de 24 V DC/ motor CA de 0.25 kW
Cultivo	(Véase Tabla 1)	Jitomate	Fresa
Condiciones de apertura y cierre	24°C-30°C (Según el código de cultivo interpretado) / Lluvia >1.5 mm	Rad lateral@300 W/m^2 y radsuperior@700 W/m^2- Temperatura de 28°C	600 - 400 W/m^2 W/m^2

4. Conclusiones

En este estudio resalta la importancia de abordar los desafíos que enfrenta la agricultura moderna debido a los factores medioambientales cambiantes, como el aumento de la temperatura y lavariabilidad en las precipitaciones. La creciente demanda de alimentos durante todo el año ha llevado a la necesidad de implementar tecnologías avanzadas para proteger y optimizar el crecimiento de frutales y hortalizas. El sistema automatizado desarrollado en este trabajo, utilizando LabVIEW como controlador y la librería "Vision Assistant" para la detección de códigos OCR, demuestra una solución innovadora para gestionar de manera eficiente los factores externos que afectan el desarrollo de las

plantas. La capacidad de ajustar automáticamente la malla sombra según los límites de temperatura específicos para cada cultivo, monitoreando simultáneamente la temperatura ambiente, es un avance significativo en la agricultura de precisión. La inclusión de una función de cierre automático en respuesta a la precipitación pluvial proporciona una protección adicional contra los efectos negativos del exceso de agua en el suelo y el cultivo. El informe generado en formato CSV brinda información valiosa sobre el estado de los cultivos, permitiendo a los agricultores tomar decisiones informadas y optimizar sus prácticas de cultivo.

Es importante destacar que este sistema representa un primer paso en la dirección correcta ya que ofrece una forma efectiva de mejorar las condiciones de cultivo, aprovechando al máximo la luz solar sin deshidratar las plantas y protegiéndolas de las temperaturas extremadamente altas y las lluvias torrenciales. Por otro lado, se pretende escalar a un sistema más grande que incluya pruebas con una mayor variedad de hortalizas. Estas pruebas permitirán medir con precisión el índice de efectividad del sistema propuesto en condiciones más diversas. El camino hacia la agricultura de precisión y la optimización de los recursos naturales es prometedor y vital para el desarrollo sostenible de la agricultura en un mundo en constante cambio.

Referencias

[1] National Geographic. (2022). ¿Cuál fue el origen de la agricultura?. *National Geographic*. https://www.nationalgeographic.es/historia/2022/01/cual-fue-el-origen-de-la-agricultura

[2] Sergieieva, K. (2023, 14 junio). Tecnología agrícola: evolución, retos y su impacto. *EOS DataAnalytics*. https://eos.com/es/blog/tecnologias-en-la-agricultura/

[3] Torres, F., & Rojas, A. (2017, 7 agosto). *Suelo agrícola en México: retrospección y prospectiva parala seguridad alimentaria*. INEGI. https://rde.inegi.org.mx/index.php/2019/01/25/suelo-agricola- en-mexico-retrospeccion-prospectiva-la-seguridad-alimentaria/

[4] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2018, 18 mayo). *Efectos del cambio climático*.gob.mx. https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/efectos-del-cambio-climatico

[5] Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in Plants: An Overview.*Environmental and Experimental Botany*, *61*(3), 199-223. https://doi.org/10.1016/ j.envexpbot.2007.05.011

[6] Naciones Unidas. (s. f.). *Causas y efectos del cambio climático | Naciones Unidas*. https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change

[7] Perry, E. |. (2006, agosto). *Pudrición de la raíz y la corona causada por Phytophthora.* UC IPM.https://ipm.ucanr.edu/QT/phytophthoracardsp.html

[8] *Efectos del exceso de humedad del suelo en el sistema radical y absorción de nitrógeno en el maíz.* (s. f.). intagri. https://www.intagri.com/articulos/agua-riego/exceso-humedad-del-suelo-en-sistema-radical

[9] Crisosto, C., Mitchell, J. (2002). Preharvest factors affecting fruit and vegetable quality. pp. 49-54. Kader, A. A (ed) Postharvest technology of horticultural crops University of California, Divisionof Agriculture and Natural Resources Oakland Publication 3311 535 p. https:// www.researchgate.net/profile/Gerhard-Fischer-2/publication/ 257409041_Efecto_del_agua_en_la_calidad_del_fruto/links/0c9605253310700c68000000/ Efecto-del-agua-en-la-calidad-del-fruto.pdf

[10] Representación AGRICULTURA Colima. (2018, 16 mayo). *No permitas que las lluvias dañen tus cultivos*. gob.mx. https://www.gob.mx/agricultura%7Ccolima/articulos/no-permitas-que-las-lluvias-danen-tus-cultivos-157302#:~:text=Existen%20dos%20tipos%20de%20efectos,la%20propagaci%C3%B3n%20de%20enfermedades%20transmisibles.

[11] Bantle, A., Cabrera, S., Carrillo, D., & Martinelli, E. (2011, diciembre). *Incidencia del daño foliar porgranizo sobre el rendimiento del cultivo de maíz (Zea Mays L.)*. Revista agromensajes de la facultad. https://fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/32/8AM32.html#:~:text=El%20granizo%20puede%20producir%20da%C3%B1os,el%20rendimiento%20del%20cultivo%20establecido.

[12] Hahn. F, (2011). *Manejo automático de malla sombra y del riego en un invernadero con tomates.Revista scientia agropecuaria*, 2(2011), 31-37. https://sites.google.com/a/unitru.edu.pe/sci-agropecu/publicacion/scagropv2n1/scagrop02_31-37

[13] Romantchik E., López C., Chávez A., Noel, & Flores L., Diego E.. (2018). *Diseño e instalación deun sistema de control automático de malla sombra, caso cultivo de fresa (Fragaria sp.). Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *9*(spe21), 4328-4340. https://doi.org/10.29312/remexca.v0i21.1534

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 34, pp. 437 – 455
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Diseño de un laboratorio remoto para el controlador PID de un sistema de carro y aeropéndulo, controlando la velocidad y posición angular

Diego Ayala Montalvo, Cristian H. Sánchez Saquín, Gabriel R. Hernández Muñoz, Alejandro Gómez Hernández, Daniel Rojo Rivera y Luis M. Villalobos Camacho

Universidad Tecnológica de Querétaro, Departamento de Tecnologías de la Información, Av. Pie de la Cuesta 2501, Nacional, 76148 Santiago de Querétaro, Qro.
cristian.sanchez@uteq.edu.mx.

Resumen

Esta investigación se enfoca en el desarrollo de un laboratorio remoto destinado a la enseñanza y práctica del control PID en dos sistemas distintos: la velocidad angular de un carro y la posición angular de un aeropéndulo. El propósito principal de este laboratorio virtual es enriquecer las habilidades prácticas, mejorar el análisis de datos y fomentar la comprensión de la aplicación de ecuaciones diferenciales y la transformada de Laplace. Asimismo, busca proporcionar una base sólida en 4 actividades fundamentales de control, caracterización de retroalimentación, caracterización de sistema, estimación de ganancias a través de una función de transferencia o de método de sintonización. La relevancia de este enfoque radica en su capacidad para involucrar activamente a los estudiantes, incluso cuando no se encuentren físicamente en la universidad. El programa se ha desarrollado utilizando LabVIEW, donde se han programado los sistemas de lazo cerrado correspondientes a cada planta. Para la estimación de las ganancias, se utiliza una entrada de escalón que se registra en un archivo CSV. A partir de esta información, se procede a estimar las ganancias mediante el análisis de la función de transferencia o la aplicación de métodos de sintonización, esto haciendo uso de MATLAB. Además, el laboratorio cuenta con una cámara webcam para visualizar el movimiento de los sistemas en tiempo real y manipularlo a distancia a través de TeamViewer.

Palabras clave: Sistemas de lazo cerrado, caracterización, PID, ganancias.

1. Introducción

En el contexto de la rápida evolución tecnológica y la creciente demanda de soluciones automatizadas en diversas industrias, el campo de los sistemas de control ha experimentado avances significativos. El diseño y la implementación de sistemas de control eficientes y precisos son esenciales para mejorar la eficiencia, la calidad y la seguridad en procesos industriales y tecnológicos [1,2]. A medida que la automatización se convierte en una piedra angular en la optimización de sistemas complejos, la educación en control automático adquiere una importancia vital para formar ingenieros competentes y capacitados.

En la evolución de la enseñanza a lo largo de los años, ha emergido un imperativo crucial: alcanzar un equilibrio armónico entre la teoría y la práctica. La teoría desempeña un papel esencial al proporcionar el entendimiento de los fundamentos, mientras que la práctica se erige como el cimiento para implementar dichos conceptos. Al fusionar de manera adecuada la matemática subyacente en el control con la experimentación práctica, los estudiantes pueden internalizar con mayor solidez los conceptos y, por consiguiente, aplicar un razonamiento más eficaz a situaciones prácticas. Este balance óptimo entre la teoría y la práctica funciona como un catalizador que enriquece la comprensión, habilidades y capacidad de resolver problemas en el ámbito del control automático.

La educación en sistemas de control ha experimentado transformaciones importantes, impulsadas por las tendencias tecnológicas y las necesidades de la industria. En este contexto, los laboratorios remotos se presentan como una herramienta prometedora para brindar experiencias prácticas y aplicadas a los estudiantes de ingeniería [3,4]. Estos laboratorios permiten a los estudiantes interactuar con sistemas reales a través de plataformas en línea, proporcionando una experiencia más cercana a los desafíos del mundo real [5]. A pesar de que estas herramientas se consideran adecuadas para el desarrollo de sistemas de apoyo en la enseñanza de materias con un componente práctico menos prominente, el aprendizaje del Control Automático o de disciplinas con un enfoque experimental substancial demanda algo más: un elemento que permita a los estudiantes aplicar de manera tangible los conocimientos adquiridos durante el estudio de la materia [6]. Dentro del ámbito académico, una proporción considerable de los estudios aborda la temática de los laboratorios remotos, poniendo especial énfasis en los aspectos vinculados al diseño arquitectónico de estas infraestructuras y a la viabilidad de las soluciones tecnológicas implementadas en su desarrollo. No obstante, se destaca una notoria disparidad en la atención prestada a la evaluación del impacto pedagógico que surge de la adopción de este enfoque de experimentación a distancia [3-9].

Por otra parte, la propuesta surge en respuesta a la dificultad que muchos estudiantes encuentran al conectar los conocimientos teóricos con la realidad de la materia, lo que conduce a altos índices de deserción. Tras un par años de enseñanza, se ha observado que la mayoría de los alumnos reprueban debido a la falta de disponibilidad o atrasos en la adquisición de los componentes importados desde China, que resultan más económicos pero pueden ocasionar demoras considerables. Además, la destreza para ensamblar estos componentes suele ser un problema para algunos. Otro problema grave, de suma importancia para superar la asignatura, es la desconexión entre la teoría y la práctica. A lo largo de las sesiones, se simula la ecuación diferencial que modela el sistema y se examina utilizando SIMULINK. Sin embargo, al carecer de una representación física tangible, los estudiantes no logran internalizar la dinámica del sistema en su totalidad. Por tanto, la propuesta de incorporar al menos una planta física como modelo de referencia desde el inicio y avanzar la teoría de manera paralela con su aplicación práctica, tiene como finalidad mejorar la comprensión del contenido. Esto permitirá una integración más efectiva de la teoría de control, brindando a los estudiantes las herramientas necesarias para aplicarla de manera más apropiada y comprender la dinámica real del sistema. Otra dificultad significativa y que impulsa la necesidad de esta propuesta es la notable escasez de experiencia práctica en el campo del control automático durante el periodo de la pandemia. La limitada presencialidad y las restricciones impuestas redujeron drásticamente las oportunidades de experimentación práctica. En este contexto, surge la importancia de implementar un sistema híbrido que aborde estas limitaciones y ofrezca una solución accesible y efectiva para estudiantes en diversas situaciones. Este enfoque híbrido busca beneficiar a aquellos individuos que no pueden asistir físicamente a la universidad debido a motivos de salud, becas en el extranjero o cualquier otra razón. La idea es que este sistema permita una participación en el aprendizaje del control automático sin importar la ubicación geográfica o las circunstancias personales. Al mismo tiempo, se brinda una oportunidad valiosa para aquellos estudiantes que pueden asistir a las clases presenciales, ya que la combinación de enfoques presenciales y remotos enriquecerá su experiencia de aprendizaje y les proporcionará un enfoque más integral y adaptado a las circunstancias cambiantes.

Se han realizado algunos trabajos relacionados de los cuales se va a enfocar en la planta propuesta o las prácticas que se realizan en ella, en [3] como tarjeta de adquisición y control usaron un Arduino y controlan la posición y velocidad angular de un motor DC, teniendo como interacción con el usuario una lcd, y se aplican 2 prácticas; sintonizar PID de velocidad y sintonizar un controlador de Dahlin, los cálculos y análisis lo hacen con MATALB.

Por otro lado, en el trabajo referenciado [4], se empleó una tarjeta de adquisición y control Arduino. La planta propuesta se configuró como un proceso térmico a escala. Las prácticas delineadas abarcan la identificación del sistema, el ajuste del controlador y la evaluación de su desempeño en el sistema físico. Para llevar a cabo los cálculos y análisis correspondientes, serecurrió a la herramienta MATALB.

Los investigadores en [7] han desarrollado una interfaz gráfica de usuario (GUI) en MATLAB para interactuar con el laboratorio de control. Además, han creado un entorno que permite realizar

cálculos matemáticos y ejecutar simulaciones de las plantas de interés con fines didácticos. Esta plataforma también se presta para aplicar perturbaciones y analizar la dinámica del sistema en respuesta. Entre las plantas simuladas se encuentran intercambiadores de calor, sistemas de control de nivel de tanque y columnas de destilación. La práctica propuesta es la sintonización del controlador PID y la interacción del controlador con la planta para visualizar el funcionamiento de cada derivado del PID.

En [8] utiliza como tarjeta de adquisición Arduino y tiene una cámara web para visualizar el movimiento real del sistema. El sistema cuenta con un servomotor, sensor de temperatura, humedad, ultrasónico y de efecto hall.

En [9] menciona varias aplicaciones de laboratorios remotos haciendo uso de MATLAB con LabVIEW, una de ellas es el control de posición angular de un motor haciendo uso de PLC-LabVIEW. En esa planta se puede modelar el motor, controlar la posición y la velocidad. Tiene un panel frontal bastante entendible y fácil de operar.

En [10] prueban el laboratorio LABNET, en el cual se puede aplicar PID teórico, PID con filtrado de la derivada y el PID con Anti-Windup. Utilizaron plantas donde se controla la temperatura pero también cuenta con llenado de tanques. Las prácticas aplicadas a alumnos fue estimar la función de transferencia entre segundo y tercer orden que mejor se ajuste a los datos en lazo abierto, también comparan la función de transferencia estimada con los datos adquiridos, con esto pueden estimar las ganancias de un PID. El análisis y estimaciones las realizan en MATLAB.

Por último en [11] usan un PLC como adquisición y administración de las señales, LabVIEW como interfaz gráfica y UniOPC para la comunicación entre PLC y LabVIEW. La interfaz consta con una cámara web para visualizar el motor que se usa como planta. Tiene las entradas de un control estándar y gráficas obtenidas. Las prácticas son comprobar la linealidad o no linealidad del proceso, así como la función de transferencia a una entrada escalón, identificación con modelos ARX, ARMAX, OE y BJ.

Tomando en cuenta lo anterior, en este trabajo se propone un enfoque que se centra en el desarrollo de un laboratorio remoto dedicado a la enseñanza y práctica del control PID en dos sistemas distintos: la velocidad angular de un carro y la posición angular de un aeropéndulo. La metodología Proporcional-Integral-Derivativo (PID) se ha aplicado en el diseño de estos sistemas de control, y su comprensión es esencial para los futuros ingenieros mecatrónicos que enfrentarán desafíos en automatización y control. La habilidad de implementar y ajustar controladores PID eficientemente se traduce en sistemas más robustos y precisos. Toda la teoría de control aplicada en el trabajo es basado en [12-15].

2. Laboratorio remoto

Como versión inicial del laboratorio remoto, se propone la implementación de dos sistemas: un aeropéndulo y un carro equipado con dos motores de corriente continua (DC). En este enfoque, se emplea el entorno de programación LabVIEW tanto para el control de los sistemas como para la interacción con los usuarios, la tarjeta de adquisición se usó un Arduino Uno. Para habilitar el acceso remoto, se emplea la herramienta gratuita TeamViewer, permitiendo así la conexión a través de un ID desde cualquier ubicación para manipular el panel frontal de manera efectiva. Las estimaciones de la función de transferencia, polos y ceros, ganancias, entre otras, se realizan con MATALB.

El sistema se enriquece con dos cámaras web integradas en LabVIEW, que posibilitan la observación en tiempo real de las operaciones. Esta implementación permite un uso tanto presencial como remoto. En entornos presenciales, el laboratorio se convierte en una herramienta valiosa para reforzar la comprensión de conceptos específicos durante las clases teóricas. La visualización en tiempo real de parámetros como ganancia estática, tiempo de asentamiento, valor pico, tiempo pico, setpoint, amplitud máxima, entrada escalón y rampa, entre otros, ofrece una comprensión más profunda de los temas abordados.

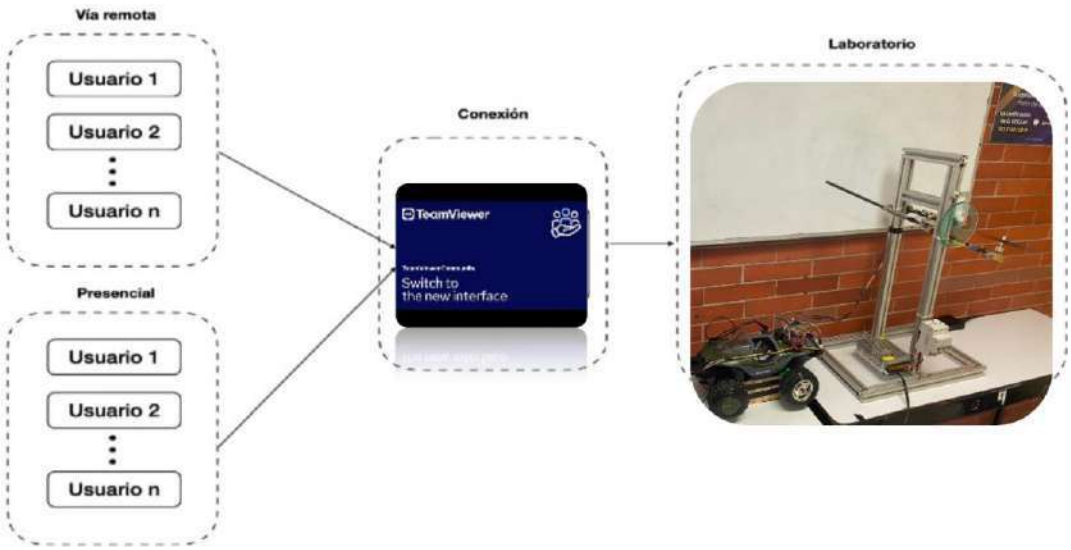


Figura 1. Interfaz usuario – TeamViewer - Laboratorio

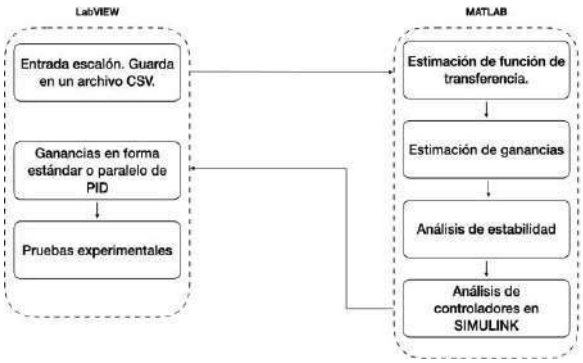


Figura 2. Software de implementación y experimentación

Además, durante las clases en aula, los estudiantes pueden conectarse simultáneamente a una sesión compartida y manipular desde sus computadoras los sistemas en tiempo real, observando directamente la dinámica de los componentes. Por otro lado, esta configuración híbrida facilita la participación de aquellos estudiantes que no se encuentren físicamente en el aula. A través de la cámara de sus dispositivos, pueden acceder a la parte teórica, mientras que las cámaras en el laboratorio les permiten visualizar la operación práctica de los sistemas. Asimismo, tienen la capacidad de interactuar plenamente con el panel frontal y controlar los sistemas en línea con sus compañeros presentes en el aula.

La estructura para la planta de control de posición angular para Aeropéndulo se compone principalmente de perfil Bosch, se encuentra fijada por tornillos M8 para dar mayor rigidez y estabilidad. La base es de acrílico, y sobre este se coloca la fuente de alimentación y la tarjetaArduino. Para el Aeropéndulo se utilizan un dos esparrago, chumaceras y soportes para varilla lineal de 8mm. Uno de los ejes se une a las chumaceras para girar y con los soportes se une el otro esparrago para que este sea el péndulo y en uno de sus extremos se ajusta el motor.

El motor que se utiliza es un Brushless A2212/13T 1000KV sin escobillas, el cual tienen un controladorDrone Driver Esc30a. El sensor es un potenciómetro lineal B1k y la fuente de alimentación es una Fuente Conmutada de 12 V, en la figura 3 se muestra el aeropéndulo.

Especificaciones técnicas del Motor:

- Corriente 12 A/60 s
- Controlador: ESC 30 A
- Corriente máxima de eficiencia: 4 – 10 A (>75%)
- Resistencia: 0.090 ohms
- Corriente máxima: 15 A para 60 S
- Voltaje de funcionamiento: 7.4 a 11.1 V
- Max. Watts: 167 W para 60 S
- Peso 47 g
- Tamaño de motor (con eje): 27.5 mm x 38.5 mm
- Diámetro del eje: 3.17 mm (3.2mm)Especificaciones del sensor:
- Tipo: carbón
- Potencia: 1 Watt
- Numero de pines: 3
- Curva resistencia: Lineal (B)
- Peso: 6g

Especificaciones de la Fuente de alimentación:

- Marca: Ronix
- Voltaje de entrada: 110/220 VCA
- Voltaje de salida: 12 CVD
- Corriente de salida: 10 A
- Potencia de salida 120 W
- Rango de ajuste en voltaje de salida: ±15%

Figura 3. Aeropéndulo

Por otro lado, la planta de control de velocidad consta de 2 motores Gm25-370 de 12 VDC de operación que, además, tienen un encoder de cuadratura de Efecto Hall que permite conocer la posición y velocidad de giro del motor. Dichos actuadores tienen una flecha o eje tipo “D” de 4 milímetros.

El carro se encuentra suspendido mediante una plataforma pasa asegurar la fijación, con el propósito de que los motores puedan activarse y estos no generen traslación del carro. Se toma esta decisiónya que resulta ser compleja la manipulación de la planta al momento de ponerla en marcha estando en el piso, ya que estas requieren de cables largos para la comunicación con el controlador Arduino.

La planta del carro tiene empotrado en el mismo chasís los dispositivos electrónicos de potencia,como lo es el puente H, potenciómetros para el cambio del setpoint, así como la placa PCB para las conexiones electrónicas de los sensores, en la figura 4 se muestra el carrito.

A continuación, se presentan las características técnicas del motor:

- Modelo del motorreductor: JGA25-370
- Material del engranaje: Metal
- Voltaje recomendado: 12V
- Tamaño: 25mm x 70mm
- Diámetro del Eje: 4mm
- Eje tipo “D”
- Peso: 97 g
- Voltaje recomendado: 12V
- Relación de Reducción: 1:34
- Velocidad sin carga: 330 rpm (a 12V)
- Corriente sin carga: ≤ 200 mA
- Velocidad Nominal: 180 rpm
- Corriente Nominal: ≤ 1.7 A
- Torque / Par nominal: 5.8 kg.cm (0.57 Nm)
- Corriente de bloqueo: ≤ 5.6 A
- Par de bloqueo: 12.0 kg.cm
- Resolución Hall aproximada: 341.2 PPR ± 10%

A continuación, se presentan las características técnicas del encoder:

- Tipo de encoder: Codificador Hall Magnético Incremental de doble fase
- Voltaje de alimentación: 3.3V – 5V
- Interfaz: PH20 (cable estándar)
- Numero básico de pulsos 11ppr
- Frecuencia de respuesta 100KHz

Figura 4. Carrito

El panel frontal tiene 4 pestañas divididas, en la primera pestaña se encuentran los botones para activar tanto el PID del carrito como del aeropéndulo, también un botón de guardado de datos, unselector del puesto de comunicación entre LabVIEW y Arduino y el botón de Stop. En la segunda pestaña se muestra el control y respuesta del motor 1 del carrito y en la tercera pestaña se muestra el control y respuesta del motor 2 del carrito. Y en la cuarta pestaña se muestra el control y respuesta del aeropéndulo. En la figura 5 se puede observar el panel frontal.

Figura 5. Panel frontal

Esta versión inicial del laboratorio remoto se presenta como una solución integral para laenseñanza de control automático. Tanto en entornos presenciales como en modalidad híbrida, esta implementación proporciona a los estudiantes una experiencia enriquecedora y práctica que abarca desde la teoría hasta la observación y manipulación directa de sistemas físicos en tiempo real.

3. Prácticas

El laboratorio remoto ha sido meticulosamente concebido con el propósito de brindar una plataforma idónea para la ejecución de prácticas que abarquen de manera integral los requisitos de la disciplina de control automático. Este entorno virtual está especialmente configurado para fomentar la adquisición de destrezas prácticas en el arte de regular y afinar sistemas, a través de la inmersión en experiencias experimentales. Mediante la interacción con sistemas reales a través de medios virtuales, los estudiantes tienen la oportunidad de no solo comprender los fundamentos teóricos, sino también de analizar los desafíos y las soluciones inherentes a la manipulación efectiva de sistemas automáticos. Para esto, se proponen 4 prácticas que en conjunto ayudan a comprender los temas teóricos y analizarlos en casos prácticos.

3.1 Caracterización de sensor

En el contexto de los sistemas de control de lazo cerrado, la caracterización del sensor emerge como un componente de vital importancia que afecta en gran medida la eficiencia y el rendimiento global del sistema. El sensor, en esencia, funge como la puerta de entrada a la percepción del sistema, traduciendo las magnitudes físicas del proceso en señales eléctricas que el controlador es capaz de interpretar. Como tal, su caracterización precisa se erige como un paso fundamental en el proceso de diseño, implementación y optimización de sistemas de control.

Una caracterización exhaustiva del sensor implica establecer con exactitud la relación entre la magnitud física que se está midiendo y la señal eléctrica que se genera como respuesta. Esta relación puede ser no lineal y estar sujeta a factores de calibración, distorsión y errores inherentes al propio sensor, desgaste, ruido, etc. De ahí que la calibración adecuada del sensor sea esencial para garantizar mediciones precisas y confiables.

La precisión y estabilidad del sistema de control dependen en gran medida de la exactitud de las mediciones proporcionadas por el sensor. Si elsensor no está caracterizado adecuadamente, los valores de referencia y los cálculos del controlador se basarían en información incorrecta, lo que podría llevar a respuestas inapropiadas o incluso a la inestabilidad del sistema. Además, la caracterización del sensor es esencial para el diseño y ajuste delcontrolador, ya que los parámetros de control deben adaptarse a las características específicas del sensor para lograr un funcionamiento óptimo.

3.1.1 Aeropéndulo

Para este sistema se caracterizó con una resolución de grado a grado, el sensor utilizado para la retroalimentación del aeropéndulo es un potenciómetro lineal, este se fijó al eje de rotación del aeropéndulo lo que hace que varíe el potenciómetro cuando el aeropéndulo gire. Se decidió leer bits ya que es la unidad directa que recibe el Arduino, es necesario convertir de bits a grados ya que la variable a controlar en el aeropéndulo es posición angular.

Primero se realizó la lectura de los bits en cada grado, para cada grado se guardaron 30 lecturas ya que se observó que la señal leída en la entrada analógica tenía ruido. Las lecturas se promediaron para conocer los bits que corresponden en cada grado. Después, para conocer la función de trasferencia del sensor se graficaron los datos. Al observar se identificó que el comportamiento es lineal $\theta(b) = -3.1509b + 0.2493$ dónde b = bits y θ son los grados.

```
Coeficiente de la pendiente: 0.24931252691773662
Coeficiente del término independiente: -3.1509368406114504
Varianza en X: 5154.171192507572
Varianza en Y: 310.0
Covarianza XY:  1284.9994441706667
Correlación de Pearson XY:  0.9999173144421111
```

Figura 6. Función de transferencia del sensor con librería Scipy.

3.1.2 Carro

Se caracterizaron dos motores utilizando LabVIEW y Bloques de Makerhub Linx para adquirir datos de los encoders. Los datos se convirtieron de pulsos por microsegundo a ranuras por segundo yluego se multiplicaron por una constante de reducción del motor (45) para obtener las ranuras por segundo. Finalmente, se convirtieron las ranuras por segundo en revoluciones por minuto multiplicando por 60.

Para caracterizar el sensor, se inicia con un procedimiento lento dividiendo el rango del PWM (de 0 a 1 en Linx) por el número deseado de muestras, preferiblemente más de 30 para una caracterización sólida. El valor resultante se incrementa gradualmente desde 0 durante la ejecución del programa para registrar las ranuras por segundo y las revoluciones por segundo en un total de 50 datos. Se debe comenzar con un PWM de 0 y aumentar progresivamente. Luego, se grafican los datos y se genera una ecuación característica. Es crucial realizar esta caracterización por cada motor, incluso si son del mismo modelo, debido a factores como el desgaste que pueden influir en un comportamiento diferente. La ecuación queda como $V(r) = -3.1509r + 0.2493$ dónde V es la velocidad en rpm y r a las ranuras del encoder.

```
Coeficiente de la pendiente: 0.07443100303861276
Coeficiente del término independiente: -2.4183096735169585
Varianza en X: 431160.38269888447
Varianza en Y: 2238.669471594318
Covarianza XY:  32091.69975479011
Correlación de Pearson XY:  0.9996267479315498
```

Figura 7. Función de transferencia del sensor con librería Scipy.

3.2 Estimación de función de transferencia

La estimación de la función de transferencia de un sistema es fundamental en el ámbito del análisis y diseño de sistemas de control, así como en diversas ramas de la ingeniería. La función de transferencia ejerce como el vínculo esencial entre la entrada y la salida de un sistema en el dominio de la frecuencia [13], ofreciendo un entendimiento profundo de cómo el sistema reacciona ante una entrada escalón y cómo se desenvuelve en términos de amplitud y fase en función de la frecuencia. La importancia de la estimación de esta función se arraiga en varias razones esenciales.

En primer lugar, la función de transferencia permite llevar a cabo un análisis exhaustivo del comportamiento del sistema. Brinda información vital sobre la dinámica del sistema, su estabilidad y las características de su respuesta tanto en regímenes transitorios como estables. Esto provee una visión precisa de cómo se adapta y reacciona el sistema en diversas situaciones. Además, la estimación de la función de transferencia es un elemento clave en el diseño de controladores. Al conocer la respuesta en frecuencia del sistema, se puede elegir y diseñar el controlador apropiado que cumpla con los objetivos de control deseados. Esto garantiza un control eficaz y optimizado del sistema. Asimismo, la estimación de la función de transferencia posibilita la predicción de las

respuestas del sistema ante diferentes entradas. Esta capacidad de anticipación es invaluable, ya que permite evaluar y planificar escenarios antes de realizar pruebas en el mundo real. De esta manera, se evitan daños potenciales y se ahorra tiempo y recursos.

La estimación de la función de transferencia se toma ante una entrada escalón de cada sistema, tomando en cuenta que la amplitud máxima será.

$$AK = \text{Amplitud máxima} \quad (1)$$
$$A = \text{Amplitud de la entrada escalón (voltaje de subministro)} \quad (2)$$
$$K = \text{Ganancia estática} \quad (3)$$

Dónde la amplitud máxima se adquiere ante la entrada escalón, para el caso del aeropéndulo son los grados máximos que recorre y los motores es la velocidad máxima, teniendo la amplitud máxima y la amplitud de la entrada escalón, se puede despejar la ganancia estática la cual es muy importante ya que es la entrada para las librerías de MATLAB System Identification y PIDTunner, que si bien lo estima muy cercano es mejor darle ese valor de entrada para que sea más precisa la estimación en base a los datos de entrada.

En las figuras 4 y 5 se muestra la respuesta ante dos entradas escalón. Se puede observar enla figura 4 que la amplitud máxima para el aeropéndulo es 154.6883 grados, en la figura 5 se observa que la amplitud máxima es de 136.06 rpm. Por lo tanto la ganancia estática para cada sistema queda como

$$K_{aeropendulo} = 0.031255 \quad (4)$$
$$K_{carro} = 136.07 \quad (5)$$

Teniendo en cuenta la ganancia estática, se procede a ingresar los valores a MATLAB con elcódigo en la figura 10.

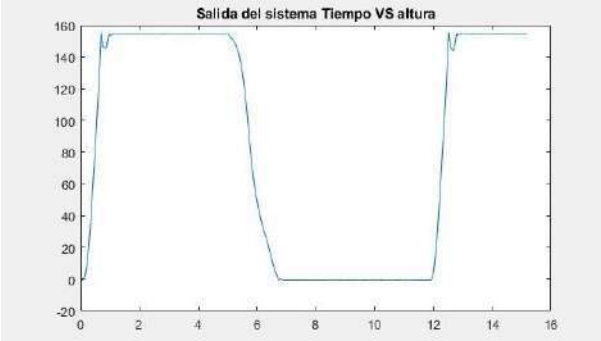


Figura 8. Respuesta ante dos entradas escalón en el aeropéndulo.

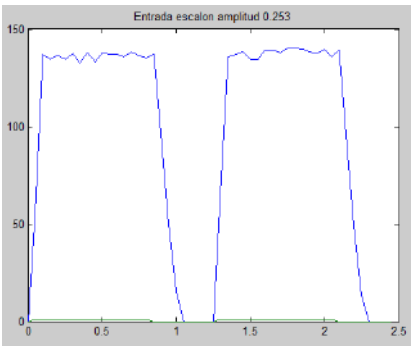


Figura 9. Respuesta ante dos entradas escalón en el carrito.

```
Func_trans_sistema1.m   AnimacionRobot.m   Sim_cinematica.m
%% Este programa guarda los datos de excel a matlab y los convierte en la
   % variable iddata
   clc %limpio el command window
   clear all % Borro variables
   I= xlsread('Datos6.xlsx','A2:A3042');%entrada al sistema
   O=xlsread('Datos6.xlsx','C2:C3042');%salida
   t=xlsread('Datos6.xlsx','B2:B3042');%tiempo muestreo
   % Plotear la gráfica de entrada
   figure(1); plot(t,O,t,I);title('Entrada escalon amplitud 150')
   % Genero el archivo IDDATA para PIDTunner System identification
   FT_datos=iddata(O,I,0.005); %función de transferencia Salida,Entrada,Muestreo
   % Plotear Salida
   figure(2)
   plot(t,O);title('Salida del sistema Tiempo VS altura')
   % Sirve para plotear en Simulink los datos de excel
   planta_muestreada=[t,O]; %plotear en simulink
```

Figura 10. Código de MATLAB para adquirir los datos de Excel.

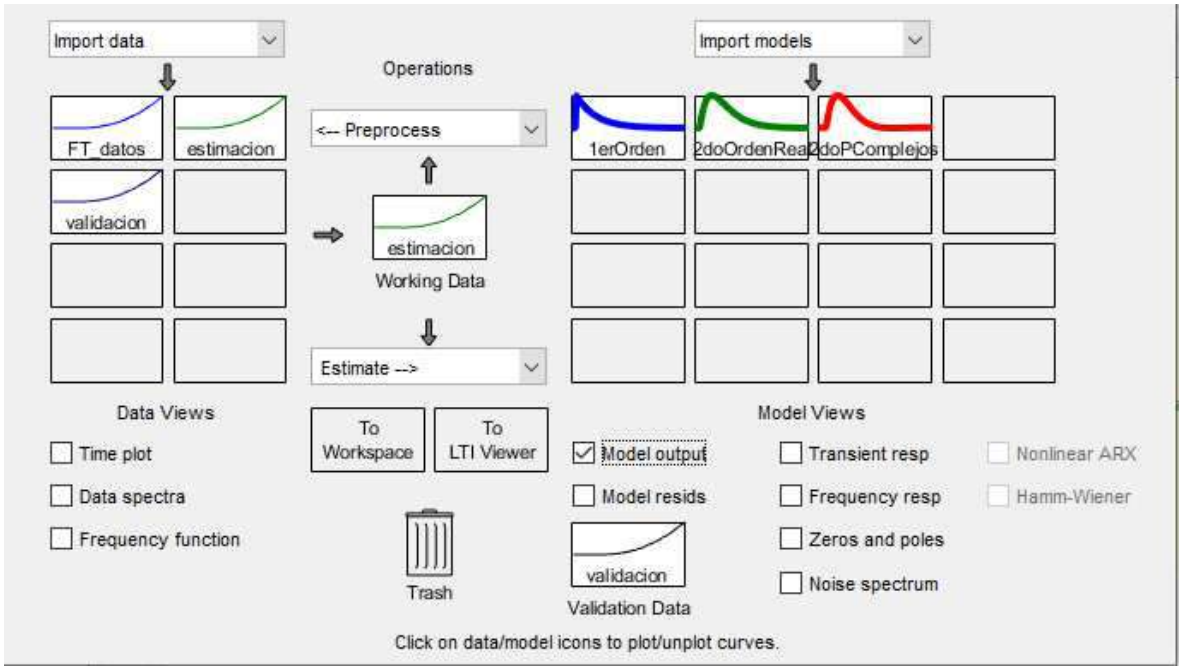


Figura 11. System Identification (aeropéndulo)

Teniendo la información en MATLAB, se procede a ingresar los datos primero en System Identification para su estimación como se observa en la figura 8 y 9. Se ingresan los dos escalones, uno se usa para la estimación y el otro para la validación, se estiman funciones de transferencia de primer orden, segundo orden con polos reales y segundo orden con polos complejos, éstas funciones de transferencia son analizadas en clase. En la figura 11 se pueden observar las 3 funcionesestimadas del aeropéndulo y en la figura 14 las funciones estimadas del carrito.

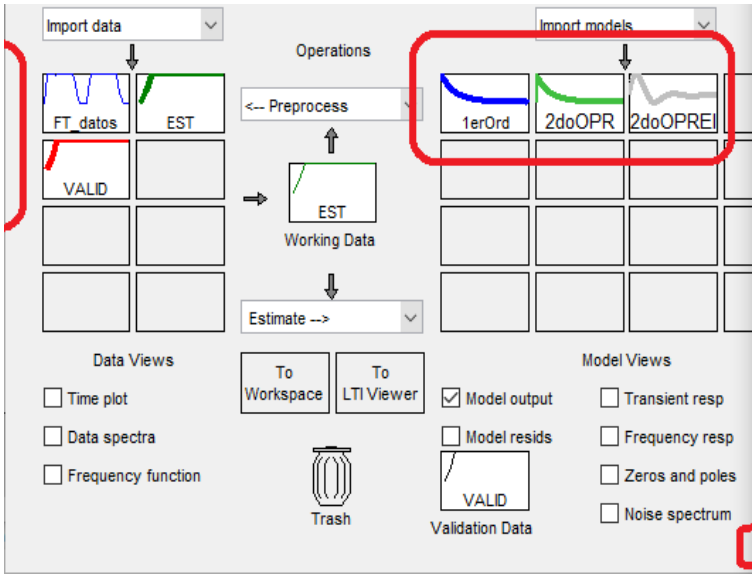


Figura 12. System Identification (carrito)

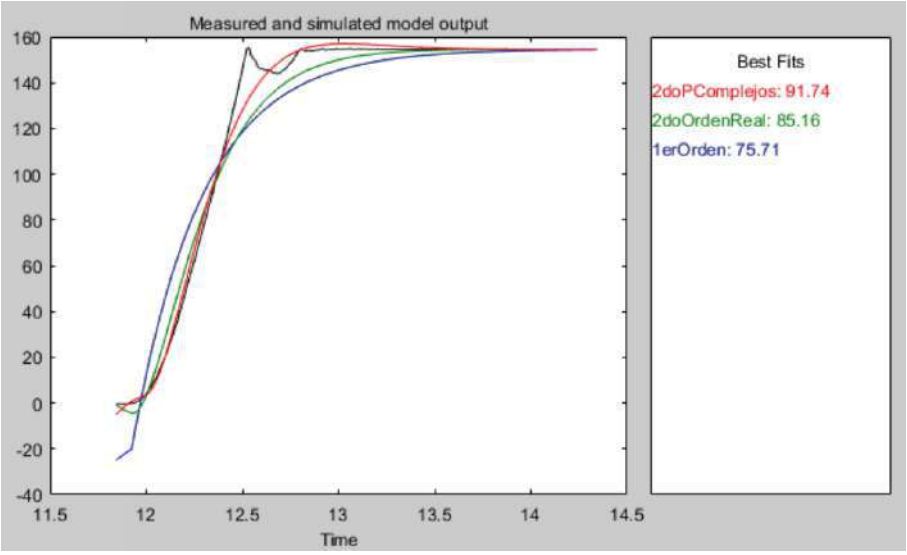


Figura 13. Estimaciones con los datos de Excel en System. (aeropéndulo)

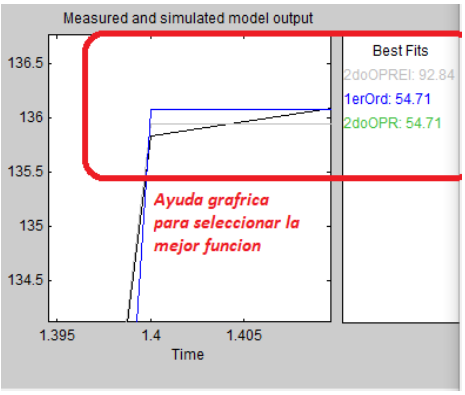


Figura 14. Estimaciones con los datos de Excel en System. (carrito)

Teniendo las funciones de transferencia estimadas, se procede a tomar la decisión de la función de transferencia que mejor porcentaje de acercamiento tenga y la que más se parezca a los datos adquiridos con la entrada escalón. En las figuras 13 se observan las funciones estimadas del aeropéndulo en la figura 11, se puede observar que la función roja (subamortiguado) es la que cerca está de los datos adquiridos. En la figura 14 se muestran las funciones estimadas del carrito en la figura 12, la cual se observa que también la función de subamortiguada es la que mas se acerca a los datos de la entrada escalón.

Como manera de ejercicio, también se estiman las funciones de transferencia en PIDTunner para realizar una comparativa con System Identification. En la figura 15 se da un ejemplo de la estimación de la función subamortiguada, teniendo como entrada los datos de la entrada escalón.

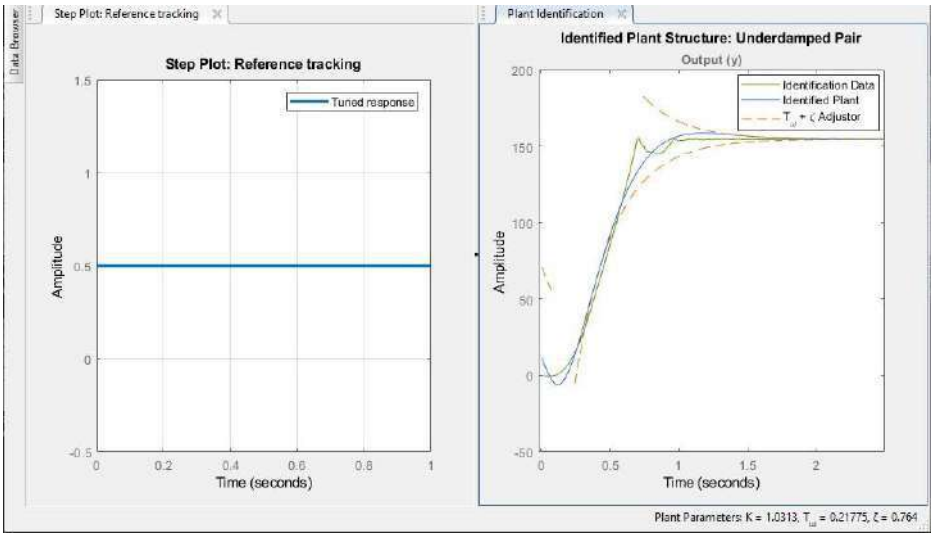


Figura 15. Estimación de F.T. PIDTunner.

Teniendo las 3 funciones de transferencia de PIDTunner y System Identification, se programan en SIMULINK para realizar la comparativa con los datos adquiridos ante la entrada escalón y decidir que función de transferencia se acerca más. Véase la figura 16.

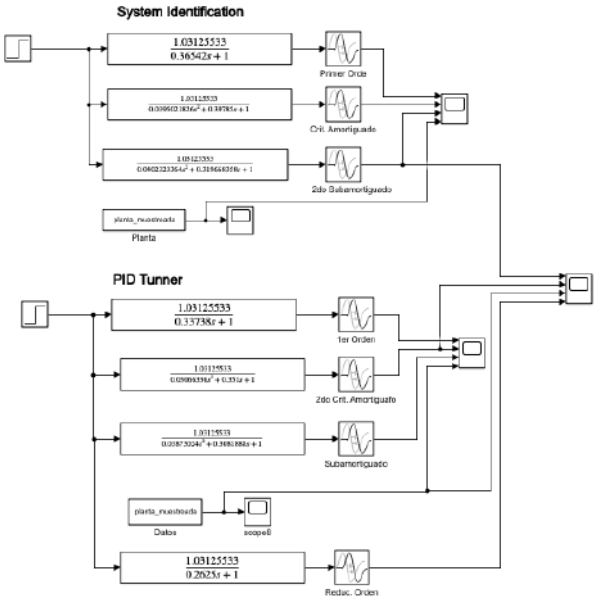


Figura 16. Funciones de transferencia en SIMULINK.

También se pueden estimar con los valores normalizados. La diferencia principal radica en el enfoque en la escala de los datos. Los datos normalizados pueden ser más convenientes para algoritmos numéricos y para comparar sistemas con diferentes escalas, mientras que los datos sin normalizar reflejan directamente las magnitudes reales y pueden requerir ajustes adicionales para asegurar la convergencia y precisión en la inferencia. La elección entre ambos enfoques dependerá de la naturaleza de los datos y de los objetivos de la inferencia de la función de transferencia.

Entonces la importancia de estimar la función de transferencia radica en varias razones fundamentales:

- **Análisis de Comportamiento:** La función de transferencia proporciona información detallada sobre cómo el sistema responde a diferentes tipos de entradas. Esto permite analizar su comportamiento dinámico, estabilidad y características de respuesta transitoria y en estado estable.

- **Diseño de Controladores:** La función de transferencia es esencial para el diseño de controladores adecuados. Conocer la respuesta en frecuencia del sistema ayuda a determinar qué tipo de controlador es necesario para alcanzar los objetivos de control deseados ygarantizar un rendimiento óptimo.

- **Predicción de Respuestas:** La estimación de la función de transferencia permite predecir cómo el sistema responderá a diferentes entradas antes de realizar pruebas en el mundo real. Esto es valioso para evaluar posibles escenarios y evitar daños o ineficiencias en sistemas físicos.

- **Ajuste y Sintonización:** Una vez estimada la función de transferencia, es posible ajustar y sintonizar los parámetros del sistema de control de manera precisa y eficiente. Esto es esencial para lograr una respuesta deseada y un rendimiento óptimo.

- **Análisis de estabilidad:** Teniendo la función de transferencia se pueden aplicar temas como análisis de polos y ceros, criterio de estabilidad de Routh Hurwitz, diagrama de Bode y análisis de estabilidad.

Por lo tanto, se aplican todos los temas teóricos de la materia y se aterrizan en casos prácticos.

3.3 Cálculo de ganancias a través de la función de transferencia

El cálculo de ganancias a partir de esta función es de importancia primordial por varias razones esenciales. En primer lugar, estas ganancias desempeñan un papel crítico en el diseño y regulación del sistema. Definen cómo la señal de entrada será amplificada o atenuada para lograr la respuesta deseada. Este factor tiene una influencia directa en la respuesta y la estabilidad del sistema controlado. Además, las ganancias son determinantes en la estabilidad global del sistema. Unas ganancias demasiado altas pueden propiciar la inestabilidad del sistema, mientras que ganancias muybajas pueden ocasionar respuestas lentas o poco precisas. Hallar el equilibrio adecuado es esencial para mantener un comportamiento controlado y predecible.

Uno de los aspectos identificados es la práctica común de introducir las ganancias de manera empírica. No obstante, esta aproximación puede conllevar a diversos problemas, especialmente cuando se carece de experiencia en el campo del control. En primer lugar, esta acción podría llevar a la saturación de los actuadores, ya que una ganancia proporcional excesiva provocaría una amplificación significativa de la respuesta. Como consecuencia, existe el riesgo de sobrecalentamiento en los actuadores, poniendo en peligro su funcionamiento óptimo. Por otro lado, se puede generar un sistema caracterizado por una excesiva oscilación. Específicamente, en dispositivos como las electroválvulas, esta inestabilidad podría ocasionar daños considerables y su eventual deterioro. Adicionalmente, la selección equivocada de ganancias podría resultar en un sistema extremadamente lento y lo peor que desde un inicio las ganancias hagan inestable el sistema. Esto contradice el propósito principal de un controlador, que es mejorar la agilidad y precisión de la respuesta del sistema.

Sabiendo la importancia del buen cálculo de las ganancias, la función de transferencia seleccionada en la sección 3.2, se usa para estimar las ganancias iniciales en PIDTunner.

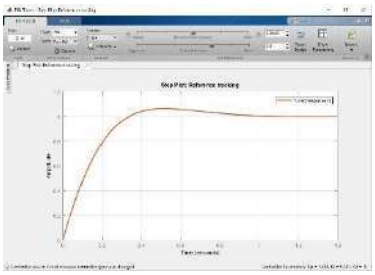


Figura 17. Estimación de ganancias en PIDTunner

Teniendo las ganancias iniciales de los controladores P, PI, PD y PID, se ingresan a SIMULINK para ajustarlas y que tenga una mejor respuesta. Teniendo las respuestas de los controladores se procede a seleccionar el controlador que mejor respuesta brinde con las ganancias ajustas, para el caso del aeropéndulo se seleccionó una **PID** y para el carrito un **PI.**

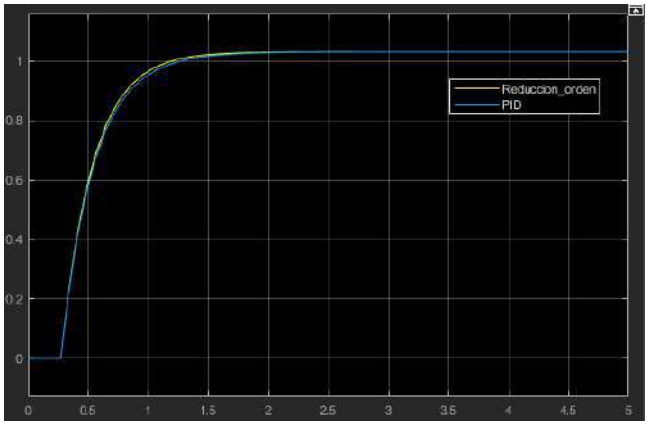


Figura 18. Respuesta del controlador seleccionado del aeropéndulo

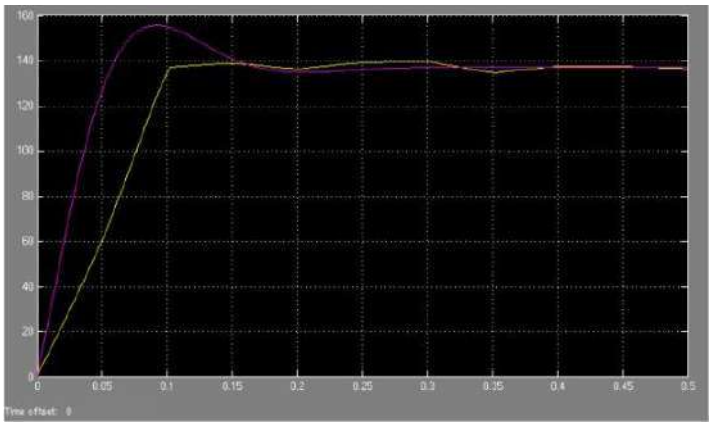


Figura 19. Respuesta del controlador seleccionado del carrito

Teniendo las ganancias iniciales se procede a probarlas en el sistema físico y si la respuesta no es muy parecida a la simulación, entonces se procede a refinar para que cumpla con un error almenos del 5% del setpoint, en la figura 20 se observa como la respuesta del aeropéndulo (gráfica blanca) queda a justo en el setpoint (gráfica roja) y dentro del +5% (gráfica verde) -5% (gráfica azul), esto se logró aplicando la teoría aprendida en clase para refinar las ganancias iniciales. En la figura 21se observa lo homologo para el motor 1 del carrito y en la 22 para el motor 2.

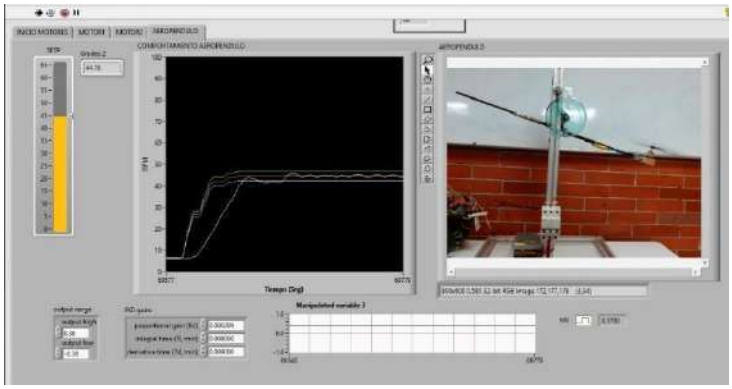


Figura 20. Panel frontal con las ganancias y la gráfica de respuesta del aeropéndulo

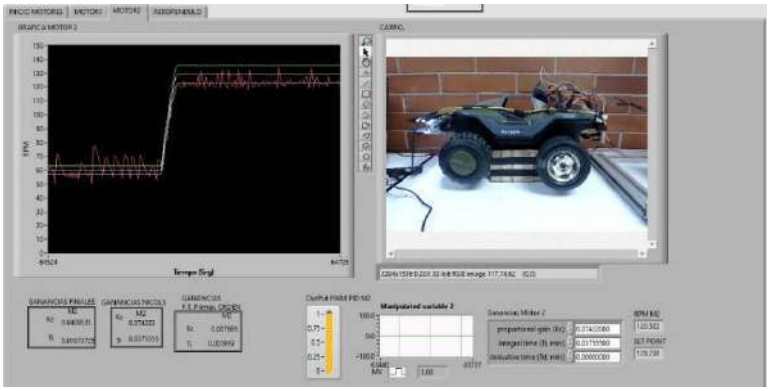


Figura 21. Panel frontal con las ganancias y la gráfica de respuesta del motor 1

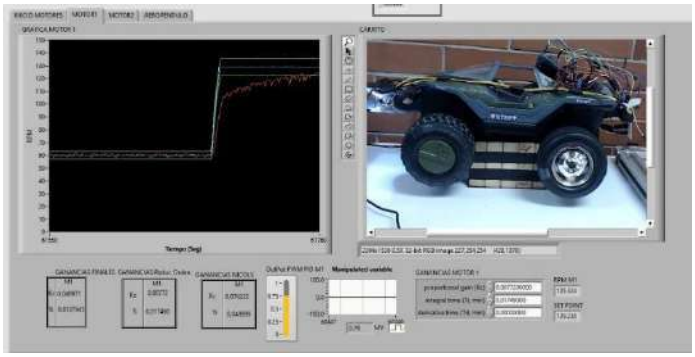


Figura 22. Panel frontal con las ganancias y la gráfica de respuesta del motor 2

3.4 Sintonización del sistema

En el ámbito del control automático, existen varias metodologías ampliamente utilizadas para sintonizar controladores PID (Proporcional, Integral y Derivativo). Estas metodologías buscan ajustar los parámetros del controlador PID de manera que el sistema controlado alcance un rendimiento óptimo en términos de estabilidad, tiempo de respuesta, error en estado estacionario y amortiguamiento. Para efectos de esta práctica, pueden optar por los siguientes métodos:

- **Método del Lugar de las Raíces (Root Locus Method):** Esta técnica se basa en el análisis del lugar de las raíces del sistema, donde se observan las trayectorias de las raíces de la ecuación característica a medida que los parámetros del controlador varían. Se puedenseleccionar ganancias que satisfagan los requisitos de rendimiento, como el lugar de las raíces que garantiza la

estabilidad y la respuesta deseada.

- **Método de Ziegler-Nichols:** Es un enfoque empírico que implica iniciar con ganancias de control muy bajas y gradualmente aumentar la ganancia proporcional hasta que el sistema entre en oscilación sostenida. La ganancia y el periodo de oscilación se utilizan para calcular los parámetros del PID.

Usando el método de Ziegler-Nichols, se encuentra la ganancia K_p en lazo cerrado que me genere oscilaciones de amplitud constante. En la figura 23 y 24 se observa para cada sistema, los valores de K_p que hacen que el sistema oscile de forma constante.

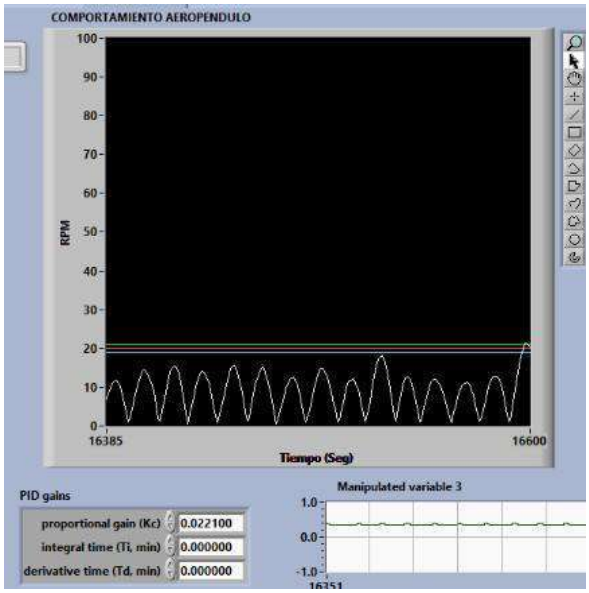


Figura 23. Oscilaciones del aeropéndulo.

Figura 24. Oscilaciones del carrito

Teniendo el valor de K_p, se usa la tabla propuesta por Nichols (véase la tabla 1) para laestimación de las ganancias iniciales.

Tabla 1. Tabla para estimación de ganancias de Nichols.

Tipo de controlador	Kp	Ti	Td
P	0.5kp		
PI	0.45kp	$\frac{T}{1.2}$ T= tiempo entre picos	
PID	0.6 kp	$\frac{T}{2}$	$\frac{T}{8}$

En las Figuras 25 y 26 se observa como el sistema queda sintonizado y teniendo una respuestarápida y que está dentro del +-5% de error del setpoint.

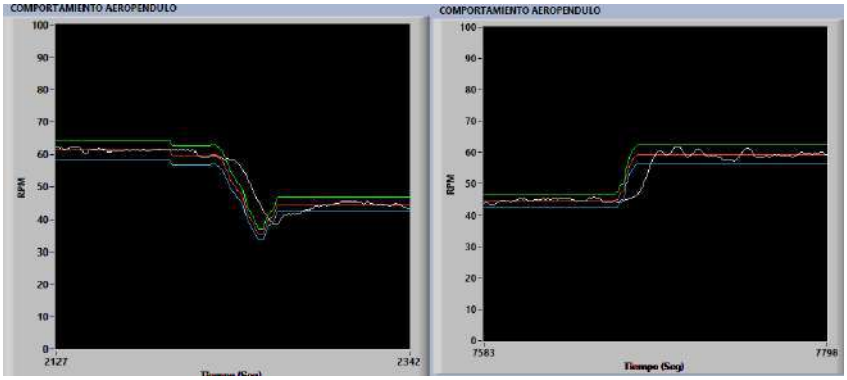


Figura 25. Respuesta aeropéndulo con las ganancias estimadas mediante sintonización

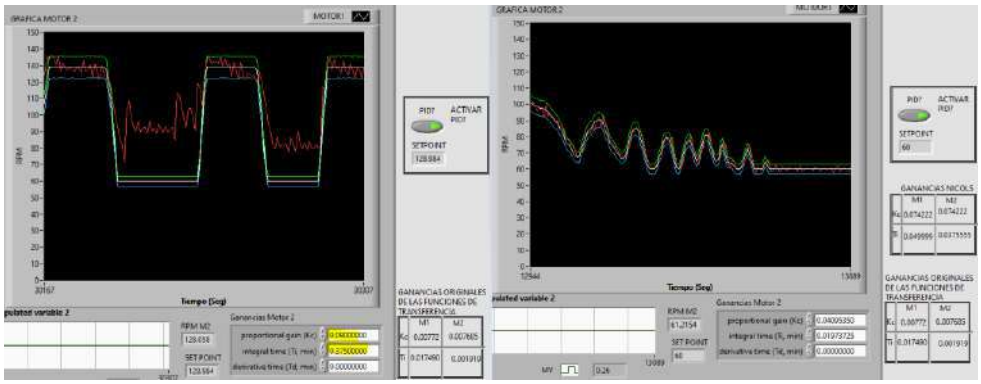


Figura 26. Respuesta Carrito con las ganancias estimadas mediante sintonización.

4. Conclusiones

La trascendencia de aplicar los conocimientos teóricos en contextos industriales o prácticos dentro de la ingeniería es de suma relevancia. Esta aplicación no solo facilita la comprensión y razonamiento de la contribución de la materia de control en la ingeniería, sino que también promueve la adquisición de experiencia en la implementación de controladores, y en particular, en la influencia de las ganancias P, I y D, así como en sus combinaciones PI, PD y PID. Al observar y experimentar con estos controladores, se obtiene una percepción notablemente más clara de sus virtudes y limitaciones. Este acercamiento práctico brinda una perspectiva más tangible de cómo estos controladores operan en la práctica y cómo afectan el comportamiento de los sistemas. Al explorar las ventajas y desventajas en tiempo real, los alumnos desarrollan una comprensión más profunda y práctica de cómo aplicar estos conocimientos en situaciones reales. Esto les otorga una base sólida y

una dirección concreta para controlar eficientemente una amplia gama de sistemas lineales.

En última instancia, esta amalgama entre la teoría y la práctica amplía las competencias y habilidades de los estudiantes, ya que los equipa con la capacidad de trascender lo puramente conceptual. Los estudiantes no solo internalizan los conceptos, sino que también los ven materializarse y experimentan sus efectos directos. Así, se les empodera para abordar desafíos reales con confianza, implementando soluciones precisas y eficaces basadas en un entendimiento informado y práctico. En consecuencia, la aplicación de estos conocimientos en ambientes reales fortalece la formación de ingenieros versátiles, capaces de afrontar las complejidades y demandas cambiantes de la industria con maestría y pragmatismo.

Es por esta razón que la plataforma de laboratorio remoto cobra una importancia significativa para la formación de futuros ingenieros. Su programación en LabVIEW proporciona una interfaz atractiva y funcional entre el usuario y la máquina, facilitando enormemente la manipulación simultánea o independiente de ambas plantas. Esta capacidad se combina con la observación en tiempo real de las respuestas dinámicas mediante gráficos y la cámara integrada. La flexibilidad de ajustar las ganancias en pleno funcionamiento y observar cómo estas modificaciones influyen en la respuesta, añade una agilidad y eficiencia excepcionales en los procesos de ajuste y sintonización. Esta capacidad de experimentación en tiempo real agiliza la optimización y permite realizar modificaciones pertinentes de manera práctica y directa. Es crucial resaltar que estas ventajas no pueden ser proporcionadas por Arduino por sí solo. La plataforma de laboratorio remoto brinda una experiencia enriquecedora y versátil que trasciende las capacidades individuales de otras herramientas. Al combinar una interfaz intuitiva, observación dinámica en tiempo real y la capacidad de ajustar parámetros de manera instantánea, se ofrece a los estudiantes un entorno de aprendizaje altamente eficaz y realista.

Esta versión se pretende usar de manera de forma continua a lo largo de 2 cuatrimestres para medir el índice de aprendizaje de los alumnos haciendo uso de formularios y midiendo la cantidad de alumnos aprobados en la materia, datos que se pretenden reportar más adelante.

Referencias

[1] Smith, R. A., & Corripio, A. B. (2021). Control de Procesos: Modelado, Diseño y Simulación.
[2] Ogata, K. (2002). Modern Control Engineering. Prentice Hall.
[3] Sistema de Laboratorios a Distancia para la práctica de Control Automático. Revista cubana ciencias informáticas vol.10 no.4 La Habana oct.-dic. 2016.
[4] Sistema de Laboratorios Remoto para las prácticas de control de la carrera de Ingeniería en Automática. Rev cuba cienc informat vol.15 no.2 La Habana abr.-jun. 2021 Epub 01-Jun-2021. Revista Cubana de ciencias Informáticas
[5] Astrom, K. J., & Murray, R. M. (2008). Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton University Press.
[6] Cooper, M. and Ferreira, J. M. M. (2009). Remote laboratories extending access to science and engineering curricular. IEEE Transactions on Learning Technologies, 2(4) pp. 342–353.
[7] Dormido, S. & Sanchez, Jhonnatan & Morilla, F. (2007). Laboratorios virtuales y remotos para la práctica a distancia de la Automática.
[8] João Paulo Cardoso de Lima, Lucas Mellos Carlos, José Pedro Schardosim Simão, Josiel Pereira, Paulo Manoel Mafra, Juarez Bento da Silva. Design and implementation of a remote lab for teaching programming and robotics. IFAC-PapersOnLine. Volume 49, Issue 30,2016. Pages 86-91. ISSN 2405-8963. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.133.
[9] Isidro Calvo, et. Al. Laboratorios remotos y virtuales en enseñanzas técnicas y científicas. e- Revista de didáctica. ISBN 1988-5911, Nº 3, 2008.
[10] Nourdine Aliane. (2010). Experiencia de uso de un laboratorio remoto de control. RIAI. ISSN: 1697-7912. Vol. 7, Num. 1.
[11] W. Ipanaqué, et. Al. Laboratorios virtuales y remotos para la experimentación. XVI Congreso Latinoamericano de control automático, CLCA 2014.
[12] Kuo, B. C., & Golnaraghi, F. (2010). Automatic Control Systems.
[13] Ogata, K. (2002). Modern Control Engineering. Prentice Hall.

[14] Astrom, K. J., & Murray, R. M. (2008). Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton University Press.
[15] Guillermo Ronquillo Lomelí. Control automático. CIDESI. 2021

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 35, pp. 456 – 464
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Desarrollo de un sistema eléctrico para el control de un robot móvil tipo AGV (Automated Guided Vehicle)

Solano Vargas Julio Cesar[1*], Barrera Fernandez Juan Manuel[1], Manzo Hernández Juan Pablo[1] y Vargas Soto José Emilio[2]

1 Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial CIDESI
2 Universidad Autónoma de Querétaro
*jsolano@cidesi.edu.mx

Resumen

En el siguiente documento se presenta el diseño eléctrico para el control de arranque de los motores de tracción y dirección de un robot tipo AGV y el circuito de alimentación de voltaje de corriente directa para los circuitos de control electrónicos. El Sistema eléctrico fue desarrollado por CIDESI para ser implementado en vehículos tipo triciclo remolcador con el objetivo de obtener un vehículo autónomamente guiado, y con ello, acelerar los tiempos de producción y evitar tiempos muertos en el transporte de materia prima en las líneas de producción en áreas cerradas y controladas de los complejos industriales mexicanos. El vehículo AGV seleccionado para este desarrollo tecnológico es un vehículo remolcador tipo triciclo de la marca FORKLIFT Nissan, el cual, por su configuración de tracción y dirección en un solo eje, permite deducir con mayor facilidad el seguimiento de trayectoria, además mediante la intervención de los sensores hall de los servomotores, se puede calcular la velocidad y dirección de trayectoria del AGV.

Palabras clave: diseño eléctrico, vehículo autónomo.

1. Introducción

Los AGV son un medio de transporte sin conductor que mediante el uso de metodologías auxiliares de generación y control de trayectoria pueden transportar materia prima, productos o personal de trabajo de un lugar a otro, sin la necesidad de tener un conductor que lo gobierne. Este tipo de tecnologías se pueden encontrar en industrias con ambientes cerrados y controlados, como la industria aeronáutica, automotriz, logística, textil, manufacturera, agroalimentaria, entre otras.

La implementación de estos tipos de robots ofrece ventajas como la reducción de tiempos de traslado de materia prima [1-3], aumento de capacidad de carga [4], reducción de accidentes laborales e incremento de tiempo útil de producción debido a que no necesitan descansar como un trabajador. Sus desventajas más notorias implican: elevados costos de desarrollo, alto grado de especialización del personal (debido al manejo de las diferentes tecnologías que les integran) y la particularidad que requieren ser implementados en ambientes controlados para evitar accidentes con el personal. De hecho, es recomendable no tener la presencia simultanea de robots autónomos y personal.

1.1 AGV, Clasificación

La literatura señala dos clasificaciones de AGV en tanto a su estructura: los tipo diferencial y tipo triciclo [1-5]. En este artículo se propone una clasificación en relación con su funcionalidad y a su estructura:

- **AGV tipo tortuga.** Transporta la carga posicionándose debajo de esta y la manipula con sistemas hidráulicos o neumáticos para posicionarla en otro lugar.

- **AGV tipo grúa.** Emplean un sistema de poleas para elevar la carga y así posicionarla en un lugar diferente.

- **AGV tipo transpaleta.** Este tipo de remolcador ubica sus paletas traseras por debajo de la carga y mediante un sistema hidráulico permite la elevación, a diferencia del tipo tortuga, su sistema de dirección se ubica por fuera de la carga.

- **AGV tipo tren.** Arrastran la carga mediante vagones, tienen buena maniobrabilidad, son fáciles de conducir e implementar en comparación con otras configuraciones de AGV,

1.2 AGV, Alimentación

Los AGV cuentan con sistemas de alimentación por baterías que pueden proporcionar valores nominales cercanos a 12, 24, 32 VDC, y en casos muy especiales para AGV de alto desempeño 120, 240 o 400 VDC, siendo estas últimas, baterías implementadas en automóviles autónomos ej. de Tesla.

1.3 AGV, Sistema eléctrico

El sistema eléctrico de los AGV consiste en redireccionar la energía eléctrica para la activación y desactivación de sus elementos de control o componentes. En su mayoría están compuestos por elementos mecánicos como botones, pedales, levas, parachoques de contacto y elementos electromecánicos cuyo movimiento permita el paso o corte de corriente en el circuito. Pueden contener elementos de control de motores, como drivers o computadoras controlables por mandos externos (señales digitales o analógicas) que, al energizar, se puedan controlar con mandos externos (señales digitales o analógicas).

El resto del artículo se despliega de la siguiente manera: En la sección 2 se presenta la metodología para la elaboración del proyecto y los materiales que se usaron para su implementación. En la sección 3 se muestran los resultados del diseño eléctrico y el diseño PCB de la tarjeta de fuentes para la alimentación de la etapa electrónica de control. Por último, en la sección 4 se presentan las conclusiones pertinentes.

2. Materiales y Metodología

La metodología propuesta para el desarrollo del proyecto (ver Figura 1), parte del análisis y determinación de los requerimientos de control de los motores de dirección y tracción (ver Figura 2 y Figura 3), a partir del paso 2 al 5, consiste en determinar los circuitos principales de control de motores del vehículo AGV y con ello deducir las señales características que controlan a cada etapa, posteriormente, del paso 6 al 8 se determina el circuito eléctrico para las pruebas físicas con el AGV, considerando un diseño eléctrico que se itera hasta su optimización y concluye con su montaje en el AGV. Finalmente, en los pasos 9 y 10 se realizan pruebas en campo para validación del circuito eléctrico.

2.1 Sistema general de control

La Figura 2 muestra los requerimientos generales para lograr el control del AGV en tiempo real. Se establece como punto central la activación de la tarjeta de control, la cual envía instrucciones al sistema de navegación, al control de motores (dirección y tracción), mientras está siendo retroalimentada por diversos sensores (encoders absolutos e incrementales, sensores LIDAR y sensores de ultrasonido) y al mismo tiempo esta envía datos para el análisis de velocidad y trayectoria del vehículo.

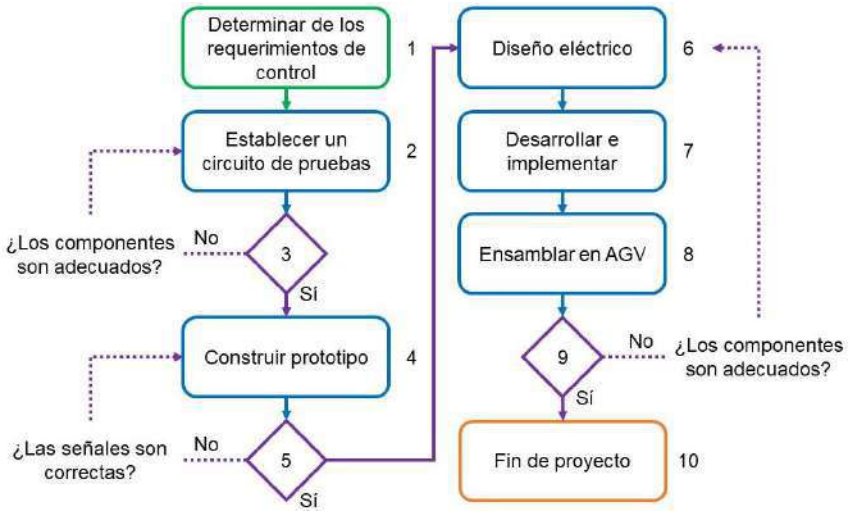


Figura 1. Metodología general para la implementación AGV.

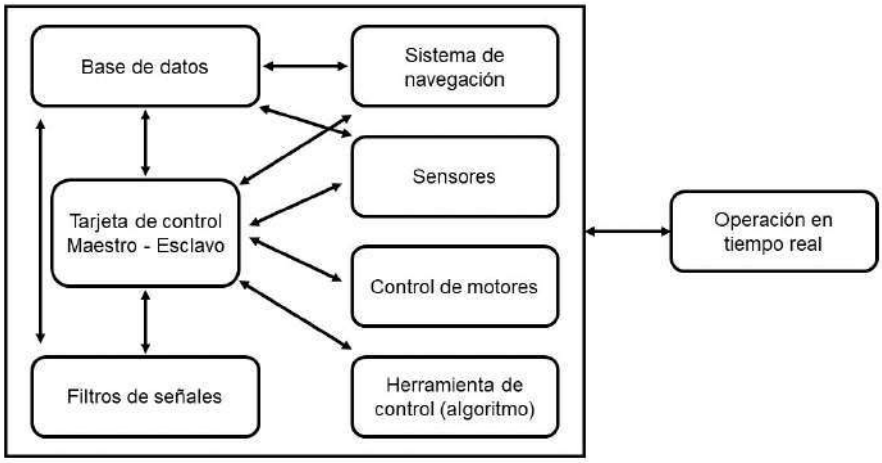


Figura 2. Diagrama de control general en el sistema AGV.

La
Figura 3 muestra el diagrama de control eléctrico y electrónico general del vehículo AGV, que se puede distribuir en 4 partes: Entradas, Salidas, Alimentación y Control.

- **Entradas.** Están definidas por: 1) un joystick o control manual que manda señales analógicas para el control de velocidad y dirección del vehículo; 2) un encoder absoluto que proporciona el valor de la dirección en un rango de 0 a 180 grados mediante una señal de 8 bits en código gray; 3) una tarjeta Tugger, la cual fue modificada para obtener los valores de los sensores hall del vehículo remolcador; 4) una FIT PC, que concentra todos los datos obtenidos durante el recorrido y al mismo tiempo los envía de manera inalámbrica al centro de control ubicado en alguna de estación de trabajo; 5) Sensores de ultrasonido ubicados estratégicamente para saber si existe algún obstáculo alrededor del AGV.

- **Salidas.** Se tienen los dos motores eléctricos: 1) de dirección que es un motor DC; 2) de tracción que consiste en un servomotor electrónicamente conmutado con tres sensores tipo hall usados para deducir la velocidad rotacional del motor y la velocidad nominal del AGV.

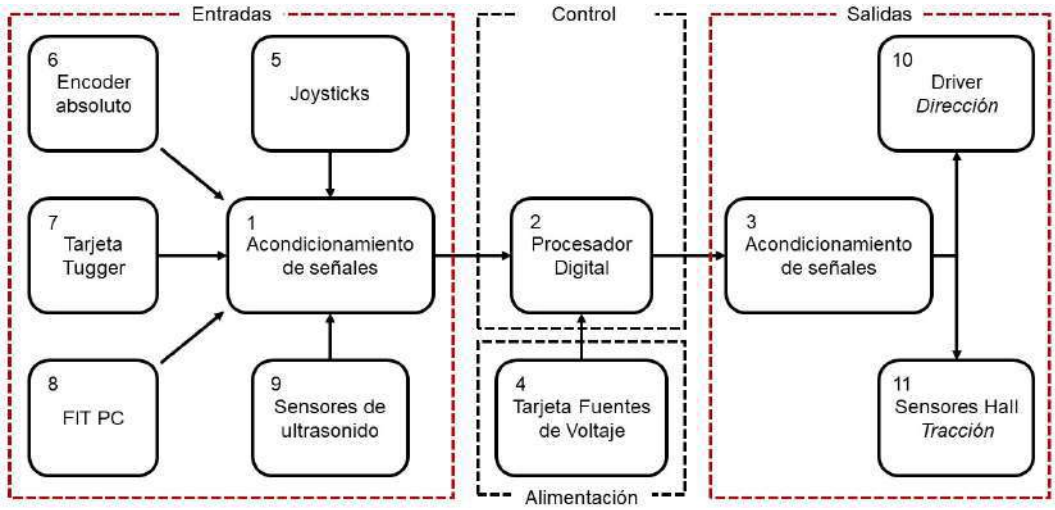


Figura 3. Diagrama general del sistema de control electrónico para AGV.

- **Alimentación.** transforma y proporciona la alimentación general de 24 volts de la batería en las diferentes señales de alimentación 3.3 V, 5 V, 12 V separando sus tierras y haciendo la señal de alimentación más estable y constante. Este diseño de separación de tierras permite al circuito disminuir los ruidos armónicos en el sistema debido a los motores eléctricos.

- **Procesador digital.** es el encargado de controlar y procesar todas las señales obtenidas por las entradas del sistema.

En la Tabla 1 se muestran los materiales eléctricos y electrónicos utilizados en el diseño, en forma general consisten en conectores, contactores, potenciómetros, fusibles; esto indica el material general para el desarrollo de este proyecto.

Tabla 1. Componentes y herramientas utilizadas en el proyecto AGV.

	Componente o herramienta
1	AMPHENOL INDUSTRIAL 97-3101A-20-27S Circular Connector, Receptacle, 14, Socket, Solder
2	AMPHENOL INDUSTRIAL 97-3106B-20-27P Circular Connector, Pin, Solder, Cable Mount
3	AMPHENOL INDUSTRIAL 97-3057-12 Circular Connector Clamp,y, 19.05 mm
4	AMPHENOL INDUSTRIAL 97-3057-1012 Circular Connector Clamp, , 19.05 mm
5	AMPHENOL INDUSTRIAL 97-79-513-12 Circular Connector Cable Clamps
6	WEIDMULLER 1760490000 Wire-To-Board Terminal Block, 2, 300 V, 16 A, 24 AWG, 14 AWG
7	TE CONNECTIVITY / POTTER & BRUMFIELD K10P-11D15-24 DPDT, 24 VDC, 15 A
8	TE CONNECTIVITY / POTTER & BRUMFIELD 27E487 RELAY SOCKET
9	TE CONNECTIVITY / POTTER & BRUMFIELD 20C297 RELAY SOCKET HOLD-DOWN CLIP
10	BOURNS 3296W-1-103LF TRIMMER POTENTIOMETER, 10KOHM 25TURN THROUGH HOLE
11	BOURNS 3006P-1-103LF TRIMMER, 10 KOHM, 15TURN, THROUGH HOL
12	BRADY M21-375-595-WT LABELING TAPE, VINYL, 9.53MM X 6.4M, BLACK/WHITE
13	BRADY BMP21-AC AC PLUG-IN ADAPTER
14	XCELITE XP600 PRECISION SLOTTED PHILLIPS SCREWDRIVER SET, ESD SAFE

	Componente o herramienta
15	KESTER SOLDER 24-6040-0027 SOLDER WIRE, 60/40 SN/PB, 190°C, 1LB
16	WELLER TC205 REPLACEMENT SPONGE

Tabla 1 (cont.). Componentes y herramientas utilizadas en el proyecto AGV.

	Componente o herramienta
17	WELLER ETS Soldering Iron Tip, Conical, 0.38 mm
18	DURATOOL 908-366A-F DESOLDERING GUN
19	EXCELTA 7-SA-SE PRECISION TWEEZER, 4.5IN
20	TE CONNECTIVITY / POTTER & BRUMFIELD K10P-11D15-24 Power Relays, PDT, 24 VDC, 15 A
21	TE CONNECTIVITY / POTTER & BRUMFIELD 27E487 RELAY SOCKET
22	TE CONNECTIVITY / POTTER & BRUMFIELD 20C297 RELAY SOCKET HOLD-DOWN CLIP
23	WEIDMULLER 1760490000 Wire-To-Board Terminal Block, 2, 300 V, 16 A, 24 AWG, 14 AWG
24	BUSSMANN BY EATON AGU-40 FUSE, 40A, 32V, FERRULE, FAST ACTING
25	BUSSMANN BY EATON C10G32 FUSE, 32A, 10X38, 400V
26	BUSSMANN BY EATON BAF-30 FUSE, 30A, 125V, FAST ACTING
27	LITTELFUSE L60030M1C FUSE BLOCK, 10.3 X 38MM, SCREW MOUNT
28	LITTELFUSE 0312035.MXP FUSE, FAST ACTING, 32V, 35A, 3AG
29	LITTELFUSE 03420004H FUSE HOLDER, 6.3 X 32MM, PANEL MOUNT
30	IDEC ASW211 SWITCH, SELECTOR, DPST-1NO/1NC 10A, 600V
31	IDEC ASW220 SWITCH, SELECTOR, DPDT-2NO,10A, 600V+B15B11:B32B7:B32A4:B32B24B19:B32AB19:B32

3. Resultados

3.1 Diseño eléctrico

El diseño eléctrico (ver Figura 4) se divide en 5 partes:

1. **Activación del circuito eléctrico.** La activación general inicia por el elemento Llave, el cual al cerrar su circuito inicia el proceso de activación de la tarjeta de fuentes, tarjeta de control, drivers de tracción y dirección, y una vez que se encuentren habilitadas cada una de estas partes, es cuando el contactor normalmente abierto Llave DSP se activa y puede mantenerse activo. Recalcar que la llave tiene un accionamiento de resorte que solamente da arranque al sistema y regresa a su estado original normalmente abierto. Por lo tanto, se necesita un sistema de enclavamiento o memoria que active la etapa de control llamado enclave Llave DSP, y el cual será desactivado una vez así le mande la señal la tarjeta de control DSP.

2. **Paros de emergencia.** Los elementos de seguridad PB1 a PB3, son paros de emergencia ubicados en la parte frontal y laterales del vehículo en dado casi exista descontrol del vehículo, estos accionamientos permitirán el corte de voltaje a todo el sistema general. De igual forma el contactor

normalmente cerrado conectado en serie y controlado por la tarjeta de control DSP puede activar de manera automática en dado caso que exista alguna anomalía en alguna señal de control.

3. **Activación de la tarjeta de alimentación de tierras separadas.**

4. **Activación de la tarjeta de control.** La activación inicia el proceso de activación de la tarjeta de control

5. **Activación de drivers de tracción y dirección del Tugger.** Los contactores power enable y Bumper habilitan los drivers de tracción y dirección del vehículo. El contactor power enable es habilitado por la tarjeta de control DSP, mientras que el contactor del Bumper en el vehículo puede desactivar ambos motores en dado que exista una colisión con el vehículo.

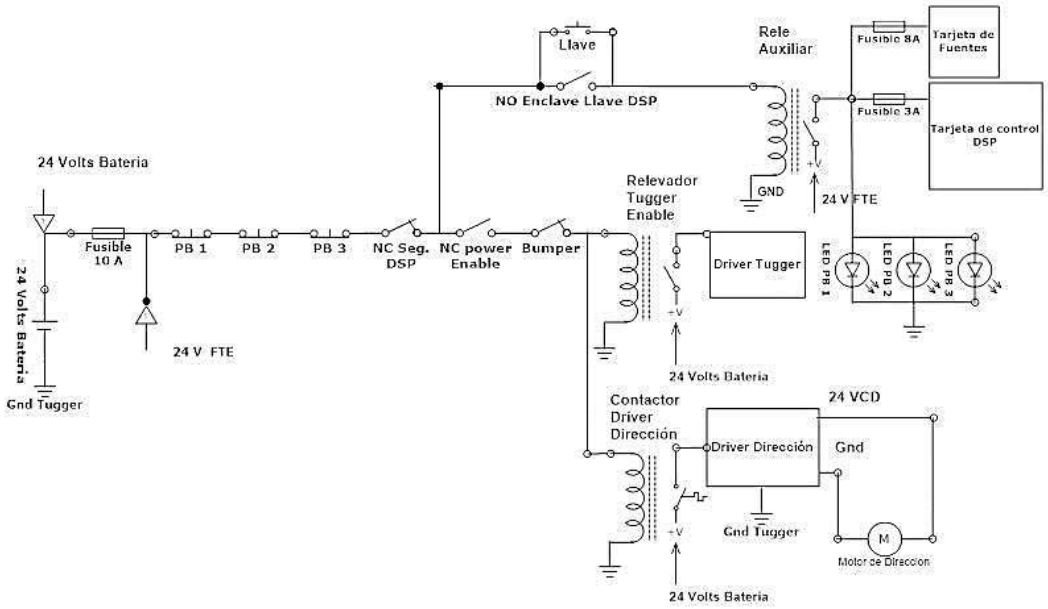


Figura 4. Diseño eléctrico para el diseño de un vehículo AGV.

3.2 Diseño tarjeta fuentes con tierras separadas

La Tarjeta de fuentes con tierras separadas es una tarjeta electrónica que proporciona 3 tipos de voltajes diferentes, 3.3V, 5V y 12V, además, proporciona un voltaje constante y sin alteraciones debido a los campos de inducción de los motores de tracción y dirección. Esto se logró en base a la adecuada selección de convertidores DC-DC aislados de la marca Murata y Xp converter.

En las Figuras Figura 5 y Figura 6 se muestra el diseño de esta tarjeta, donde en la parte izquierda se conecta el voltaje general a 24 volts directamente de la batería del vehículo remolcador. En la parte se ubican los convertidores a 12 Volts, junto con 2 reguladores de voltaje a 3.3V y 5 V que están direccionados para la alimentación y señales electrónicas de control (diseño considerado por el convertidor Murata), mientras que el Xp converter con salida a 12 volts es direccionado para la activación de los sensores de ultrasonido y Bumper del vehículo.

La fabricación de la tarjeta de fuentes separadas (ver Figura 7) fue hecha por un material tipo FR-4 con sustratos para PCB reforzada por una lámina epóxica color verde con una resistencia de hasta 150°C. La placa PCB cuenta con 2 superficies de contacto eléctrico (top y bottom) y 3 de aislamiento eléctrico (Substrato en top, substrato en bottom y un núcleo de aislamiento Prepreg).

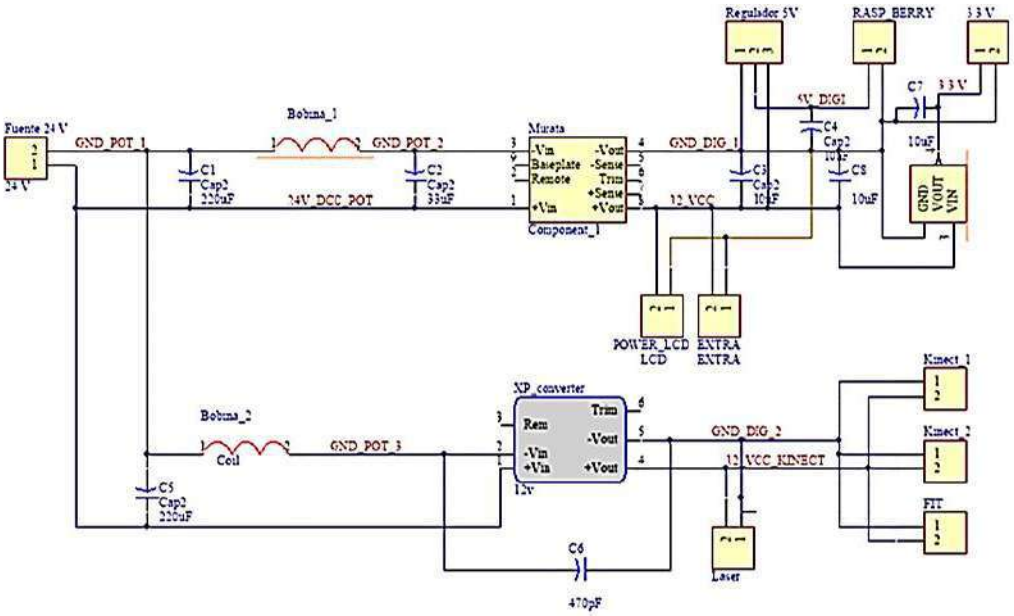


Figura 5. Diseño PCB esquemático de tarjeta de fuentes con tierras separadas.

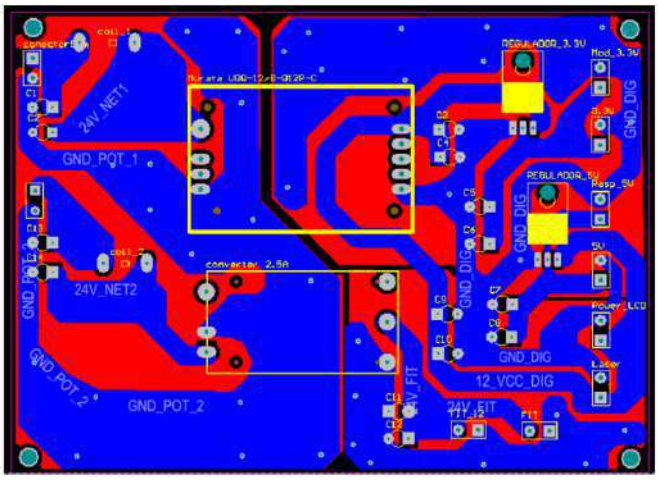


Figura 6. Diseño PCB de la tarjeta de fuentes con tierras separadas.

Figura 7. Tarjeta de fuentes con tierras separadas.

3.3 Presentación de vehículo remolcador AGV

La Figura 8 muestra la implementación en el AGV.

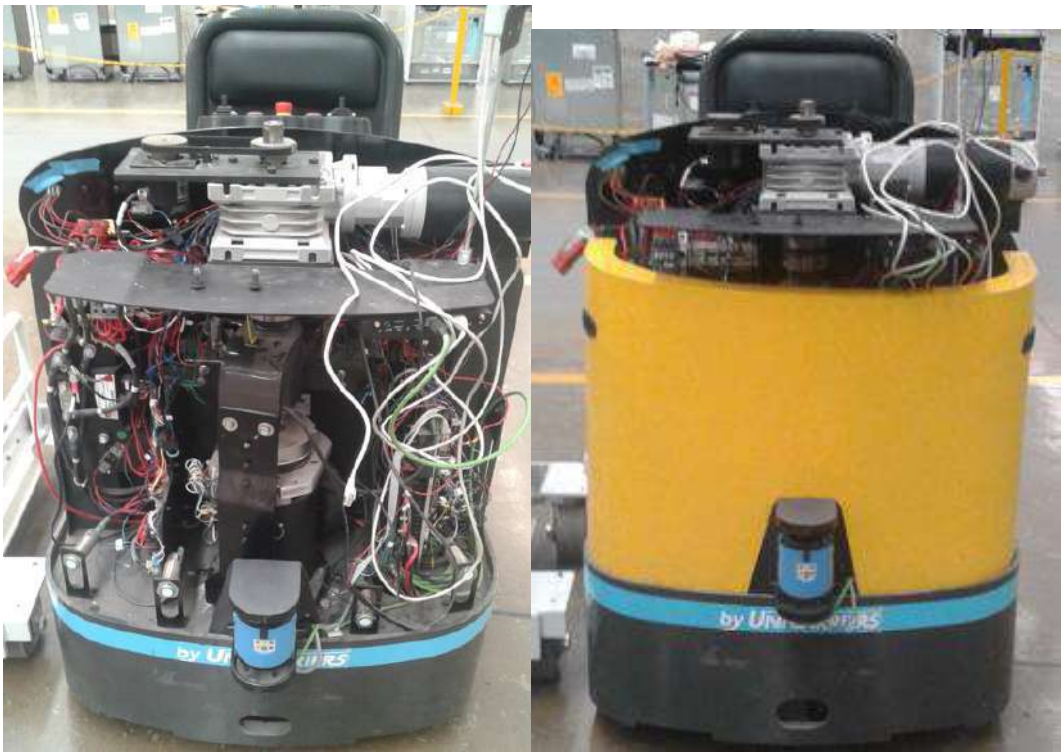


Figura 8. Implementación del circuito eléctrico en el AGV

4. Conclusiones

El diseño e implementación del circuito eléctrico aquí mostrado es el primer paso para una propuesta innovadora de un vehículo autónomo, dicho circuito puede ser instalado y modificado en otro vehículo con características similares para su transformación en un AGV. Si bien los materiales no fuesen idénticos, el diseñador puede recurrir a una selección similar para garantizar su desempeño. Cabe señalar que un punto crucial durante la implementación fue la deducción de los sensores hall del motor de tracción, siendo estos los que proporcionan de manera indirecta la posición y velocidad del motor, requiriendo que la implementación de este nuevo circuito se llevase con extremo cuidado para no dañar la estructura principal del vehículo remolcador.

Referencias

[1] Madrigal Alejandro, Muñoz Nelson, “Vehículos de guiado autónomo (AGV) en aplicaciones industriales: una revisión” Revista politécnica, ISSN 19000-25351, año 15, Numero 28, Paginas 117-137, 2019.
[2] Martínez J. Cesar, Luna Francisco, “Vehículo automáticamente guiado por odometría y visión artificial”, TecNM de Aguascalientes, DOI: 10.6036/8420
[3] Vera German, Loor Antony, “ Review de vehículo autónomo guiado”, polo del conocimiento, Edición 71, Vol. 7, ISSN: 2550-682X Junio 2022, paginas 2514-2549,

[4] F. Espinoza, C. Santos, “Transporte multi AGV de una carga: estado del arte y propuesta centralizada”, Revista Iberoamericana de automática e informática industrial Vol. 18, paginas 82-91, 2021.
[5] Jorge Pérez, “Sistema de control de robot móvil para transporte de material”, Centro de ingeniería y desarrollo industrial CIDESI, 2016, tesis de maestría.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 36, pp. 465 – 480
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Una revisión general de la aplicación de diferentes tecnologías en sistemas hidropónicos

Sandoval Castro Daniela Olivia ([2]), Vázquez Cervantes Alberto ([1])
y López Melchor Lebni Zaabdi ([1])

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial ([1]). Centro de Investigaciones en Óptica A.C. ([2]).
albertovcervantes@gmail.com

Resumen

El presente trabajo muestra una revisión general de las aplicaciones de diversas tecnologías en sistemas hidropónicos. Inicialmente, se introduce al lector en el mundo de la hidroponía, destacando la creciente importancia de las tecnologías modernas en la agricultura. Se traza la evolución histórica de la hidroponía, resaltando los avances tecnológicos que han marcado su desarrollo. Se abordan las ventajas que la tecnología ha aportado en términos de eficiencia, sostenibilidad y productividad, así como los desafíos que enfrenta su adopción. El núcleo de este artículo se centra en las tecnologías clave, desde sistemas de control automatizado, iluminación artificial, técnicas avanzadas de monitoreo y análisis de datos, hasta la integración de IoT y el uso de realidad aumentada y robótica. Se presentan estudios de caso que ejemplifican la aplicación exitosa de estas tecnologías y se reflexiona sobre su impacto ambiental y contribución a la sostenibilidad. Finalmente, se concluye con una síntesis de los hallazgos más significativos y se proponen recomendaciones para futuras investigaciones, subrayando las áreas de oportunidad en el desarrollo tecnológico de la hidroponía. Esta revisión busca ser una guía integral para investigadores, profesionales y entusiastas del campo, ofreciendo una visión clara del estado actual y el potencial futuro de la integración tecnológica en sistemas hidropónicos.

Palabras clave: Hidroponía, Sensores, Iluminación artificial, LED, Monitoreo y análisis de datos, Machine Learning, Inteligencia Artificial, Internet de las Cosas (IoT)

1. Introducción

La hidroponía, con raíces grecolatinas que se originan de las palabras griegas "hydro" (agua) y "ponein" (trabajar, esforzarse), es una técnica de cultivo de plantas en soluciones acuosas (ricas en nutrientes), en lugar de suelo. Ésta manera de cultivar ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, ya que su desarrollo ha sido catalizado por la adopción de tecnologías avanzadas como la telemetría y la agricultura de precisión, que han optimizado tanto la eficiencia como la productividad de estos sistemas de cultivo. En un mundo donde la demanda de alimentos está en constante aumento, la hidroponía se presenta como una alternativa sostenible, especialmente en regiones con suelos no aptos para la agricultura tradicional [1].

Un componente crucial en la modernización de la hidroponía es el monitoreo y análisis de datos en tiempo real. La implementación de herramientas analíticas especializadas y software, junto con la aplicación de técnicas de aprendizaje automático e inteligencia artificial, ha revolucionado la gestión y optimización de los sistemas hidropónicos [2].

Este artículo se centra en las tecnologías emergentes que están redefiniendo la hidroponía, con especial atención en las estrategias de monitoreo y análisis de datos. Se explorarán diversas herramientas y técnicas que permiten un control más preciso de los sistemas hidropónicos, así como las tendencias futuras que podrían influir en la evolución de esta forma de agricultura tecnológica.

2. Historia y desarrollo de sistemas hidropónicos

La hidroponía tiene sus raíces en la antigüedad. Sin embargo, es crucial destacar los avances técnicos que han permitido su modernización [3]. La práctica de la hidroponía se realiza desde antiguas civilizaciones, que ya reconocían los beneficios de cultivar plantas sin la necesidad de suelo [4].

2.1 *Evolución histórica de la hidroponía*

Los registros históricos sugieren que en la antigüedad, los babilonios tenían Jardines Colgantes, evidenciando que ya practicaban las técnicas hidropónicas. Estos jardines son una de las Siete Maravillas del Mundo Antiguo y, aunque no son estrictamente hidropónicos, ni colgantes, –según las definiciones modernas–, son un testimonio de la capacidad humana para cultivar plantas en condiciones adversas [4]. Según el geógrafo griego (Estrabón, siglo I a.C.), estos jardines consistían en árboles y plantas que crecían en terrazas abovedadas alzadas en niveles superpuestos (uno encima del otro), que eran soportadas por pilares cúbicos. La imagen visual de los Jardines Colgantes se describe como lo que podría parecer una cascada verde o una montaña, sin embargo, éstas terrazas estaban lo suficientemente profundas para rellenarlas con tierra para poder plantar árboles grandes. Los materiales que se usaban para la construcción consistían, principalmente, en: ladrillo cocido, piedras y asfalto. Aunque no se sabe con exactitud cómo funcionaban éstos jardines, se cree que contaban con un sistema de riego bastante avanzado para su época. Puede que se hubiera utilizado un sistema de acueductos, o máquinas capaces de elevar agua, para transportar agua del río Éufrates y ésta, –después–, se distribuía por canales y zanjas para regar las plantas de todos los niveles de terrazas. Aunque este sistema no era un sistema hidropónico, la habilidad que aplicaron los babilónicos para controlar y manejar el agua, de manera cuidadosa, muestra que se tuvo una comprensión temprana sobre la importancia de la ingeniería de control aplicada al riego y a la nutrición vegetal [5].

Otro ejemplo de esto son las chinampas aztecas (declaradas en 1987, por la UNESCO, como Patrimonio de la Humanidad). Su significado proviene del náhuatl *chinampan* ("en la cerca de cañas", por su significado en español) y es un sistema de agricultura mesoamericano que se utilizaba en la antigua ciudad de Tenochtitlán (capital del Imperio Azteca) –mismo que, hoy en día, se conoce como Ciudad de México (CDMX)–. Éstas son islas artificiales que permitían cultivar plantas, verduras y hortalizas (incluyendo frijol, maíz, chile, flores y calabazas). Se construían en zonas con abundante agua, como lagos y pantanos, apilando capas alternas de lodo en el fondo del cuerpo de agua, para delimitarlo con estacas de sauce (mismas que, con el tiempo, mantenían unida la estructura gracias a las raíces que brotaban de éstas). Las chinampas también contaban con un circuito de canales que permitía transportar cosas en canoas. La similitud de este sistema –comparado con el de un sistema hidropónico– consiste en la optimización de los recursos de agua con nutrientes, la capacidad de cultivar sin suelo y la maximización de producción en un espacio limitado [6].

Aunque la hidroponía ha ganado popularidad en los últimos 80 años, sus orígenes y métodos se remontan a miles de años atrás. El primer libro moderno que discute el cultivo de plantas sin tierra es "Sylva Sylvarum", escrito por Sir Francis Bacon en 1627. A lo largo de los años, se han realizado diversos experimentos y avances en este campo, como el experimento del árbol de sauce de Jean Baptist van Helmont en 1648, las investigaciones de John Woodward en 1699, y la publicación de la primera fórmula de solución nutritiva por Julius Von Sachs en 1860. En la década de 1930, William Frederick Gericke, conocido como el "Padre de la Hidroponía", cultivó tomates de 25 pies de altura usando solo agua y nutrientes. A partir de entonces, la hidroponía ha sido adoptada en diversas aplicaciones, desde la producción de alimentos en bases militares durante la Segunda Guerra Mundial hasta investigaciones de la NASA para sistemas de soporte vital ecológico controlado. En las últimas décadas, la hidroponía ha experimentado un crecimiento significativo, con empresas y tecnologías emergentes que continúan impulsando la industria [5]. En la figura N° 1 se muestra la línea del tiempo de los acontecimientos más relevantes que ocurrieron en torno a la evolución y al desarrollo de la hidroponía.

A lo largo del tiempo, la hidroponía ha experimentado transformaciones significativas, impulsadas por investigaciones y experimentos globales. Las investigaciones y experimentos realizados en

diferentes partes del mundo han contribuido al desarrollo y perfeccionamiento de las técnicas hidropónicas, permitiendo su aplicación en diversos contextos, desde la investigación científica hasta la producción comercial [7].

Figura 1. Línea del tiempo de la historia de la hidroponía.

2.2 *Cambios y avances tecnológicos clave en la historia de la hidroponía*

El avance tecnológico ha jugado un papel crucial en la evolución de la hidroponía. Con el advenimiento de la tecnología moderna, se han desarrollado sistemas hidropónicos más eficientes y sostenibles. Estos sistemas, impulsados por la innovación tecnológica, han permitido a los agricultores maximizar la producción y minimizar el uso de recursos [8]. Según (INTAGRI S.C., 2017), el rendimiento de los cultivos hidropónicos es mayor que la que se puede obtener de los cultivos en suelo (véase figura Nº 2).

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés, *Internet of Things*) es una de las innovaciones tecnológicas más importantes que ha impactado en la hidroponía. La integración de IoT en sistemas hidropónicos y aeropónicos ha permitido un monitoreo y control más preciso de las condiciones de cultivo, lo que ha llevado a mejoras en la eficiencia y productividad [10].

Muchos países utilizan y/o desarrollan tecnología para la optimización de cultivos, algunos de ellos son: Alemania, Arabia Saudita, Argentina, Australia, Botswana, Brasil, Canadá, Chile, China, Corea del Sur, Egipto, España, Estados Unidos de América, Finlandia, Francia, India, Irán, Israel, Italia, etc [11].

Científicamente, se han explorado técnicas de cultivos hidropónicos semi-automatizados con lógica difusa [12], se han entrenado redes neuronales convolucionales para detectar deficiencias de nutricionales en las hojas de las plantas, tecnológicamente, se han lanzado al mercado sistemas de cultivo automatizados que dependen de tierra con nutrientes (e insumos que la misma empresa ofrece (como sus cápsulas con semillas y tierra nutrida), pero en estos sistemas no se puede cultivar cualquier semilla y el usuario se vuelve dependiente de la empresa para consumir sus insumos.

Actualmente, en México, no es muy popular el cultivo de auto-consumo, por lo no hay empresas que hayan desarrollado cultivos automatizados y, en el mundo, no existen sistemas hidropónicos completamente automatizados. En cuestión de investigación, todavía no se ha explorado la combinación de diferentes tecnologías y áreas del conocimiento (como lógica difusa e inteligencia artificial) para automatizar sistemas hidropónicos.

Cultivo	Hidroponia (t/ha)	Suelo (t/ha)
Arroz	6.0	1.2
Avena	2.8	1.12
Betabel	30	10
Col	20	14.5
Frijol	50	12
Tomate	200-700	25-30
Lechuga	23	6-10
Pepino	31-35	7-10
Trigo	4.6	0.67

Figura 2. Comparación del INTAGRI S.C. sobre el rendimiento de cultivos en dos sistemas de producción: Suelo e hidroponía [9].

Áreas Claves	Avances Conocidos	Desafíos y Desconocidos	Avances Futuros	Problemas Sin Resolver
Agricultura de Precisión	Uso de datos y análisis avanzados en el manejo de cultivo.	Integración efectiva de tecnologías avanzadas en sistemas de cultivo existentes.	Gestión más eficiente y precisa de los cultivos.	Comprensión de la interacción entre factores en el ambiente hidropónico.
Cultivos Hidropónicos	Mejora de eficiencia con la automatización y tecnología.	Efectividad a largo plazo de la automatización y las tecnologías en agricultura.	Uso de técnicas de Ingeniería de Control para mantener un ambiente de cultivo estable.	Desarrollo de sistemas de automatización más accesibles y su impacto a largo plazo.
IA y Visión por Computadora	Detección automática de plagas y optimización de condiciones de cultivo.	Incertidumbre de cómo estas tecnologías cambiarán el manejo de los cultivos en el futuro.	Automatización de tareas como control de iluminación y detección de enfermedades.	Necesidad de nuevas formas de aplicar IA y visión por computadora en la agricultura.
Nutrición Vegetal	Identificación de deficiencias nutricionales a través de la observación.	Efecto del estrés por calor o sequía en la identificación visual de deficiencias.	Optimización de la solución nutritiva y mejora de la absorción de nutrientes.	Desarrollo de métodos más precisos para determinar deficiencias nutricionales.
Cultivo en Suelo	Influencia de los factores del suelo en la disponibilidad de nutrientes.	Cantidad exacta de nutrientes absorbidos en sistemas hidropónicos vs cultivos de suelo.	Mejora en la comprensión de cómo los factores del suelo afectan la absorción de nutrientes.	Investigación en cómo las variaciones en condiciones del suelo afectan la disponibilidad y absorción de nutrientes.
Luz para el Crecimiento de Plantas	Uso de luz artificial para estimular o estresar el crecimiento.	Combinación óptima de longitudes de onda para diferentes cultivos y efectos a largo plazo.	Avances en la tecnología de iluminación para personalizar las condiciones de luz.	Investigación en cómo diferentes longitudes de onda afectan a distintos tipos de plantas y etapas de crecimiento.
Sensores y Actuadores	Uso de sensores de bajo costo y actuadores en el cultivo hidropónico.	Calidad y precisión de los datos de estos sensores de bajo costo.	Uso de sensores y actuadores de bajo costo para monitorear y controlar parámetros importantes en un cultivo hidropónico.	Investigación en la mejor manera de integrar sensores y actuadores de bajo costo para maximizar su eficacia y minimizar los costos.

Figura 3. Tabla comparativa del estado del arte de diferentes áreas del conocimiento aplicadas a la hidroponía.

3. Ventajas y desafíos de la integración tecnológica en la hidroponía

La hidroponía ha experimentado una transformación significativa con la integración de tecnologías avanzadas. Esta integración ha traído consigo una serie de ventajas y desafíos que se discuten a continuación.

3.1 *Beneficios de la implementación tecnológica en términos de eficiencia, sostenibilidad y productividad.*

1. **Eficiencia**: La tecnología ha permitido un monitoreo preciso de las condiciones de cultivo, lo que resulta en una administración más eficiente de los recursos y una optimización de los rendimientos. Por ejemplo, estudios han mostrado que el uso de sensores puede reducir el consumo de agua en un 20% [13].
2. **Sostenibilidad**: La hidroponía moderna, respaldada por la tecnología, promueve prácticas agrícolas sostenibles al reducir el uso de agua y minimizar el desperdicio.
3. **Productividad**: Con la ayuda de sistemas automatizados y sensores, es posible detectar y responder rápidamente a las necesidades de las plantas, lo que lleva a una mayor productividad y rendimientos más altos. Estudios han demostrado que la productividad puede aumentar hasta en un 25% con el uso de tecnologías modernas [14].

3.2 *Desafíos y barreras a la adopción de nuevas tecnologías*

1. **Costo inicial**: La implementación de tecnologías avanzadas en sistemas hidropónicos puede requerir una inversión inicial significativa, lo que puede ser una barrera para muchos agricultores [15].
2. **Complejidad técnica**: La integración y operación de sistemas tecnológicos avanzados pueden requerir conocimientos técnicos especializados [16].
3. **Resistencia al cambio**: Tradicionalmente, muchos agricultores pueden ser reacios a adoptar nuevas tecnologías debido a la falta de familiaridad o miedo al cambio [16].

4. Tecnologías clave en sistemas hidropónicos

La hidroponía ha experimentado avances significativos con la incorporación de tecnologías modernas. Estas tecnologías no solo han mejorado la eficiencia y la productividad, sino que también han abierto nuevas posibilidades para la automatización y el control preciso de los sistemas hidropónicos. A continuación, se describen algunas de las tecnologías clave en sistemas hidropónicos.

4.1 Sistemas de Control Automatizado

Los sistemas de control automatizado son fundamentales para la gestión eficiente de los cultivos hidropónicos. Estos sistemas permiten el monitoreo y control en tiempo real de diversas variables como la temperatura, la humedad y los niveles de nutrientes, lo que resulta en una producción más eficiente y sostenible [17].

4.1.1 Sensores para monitoreo de condiciones ambientales

Los sensores son dispositivos que capturan datos del entorno y los envían a un sistema de control centralizado. Estos pueden incluir sensores de temperatura, humedad, pH y conductividad eléctrica. La utilización de sensores inalámbricos de bajo consumo energético ha demostrado ser especialmente útil en la agricultura hidropónica [18].

4.1.2 Automatización del riego y nutrición

La automatización del riego y la nutrición es otra área clave en la que la tecnología ha tenido un impacto significativo. Los sistemas automatizados pueden programarse para suministrar agua y nutrientes a las plantas en momentos específicos o en respuesta a ciertas condiciones, lo que maximiza la eficiencia y minimiza el desperdicio [19].

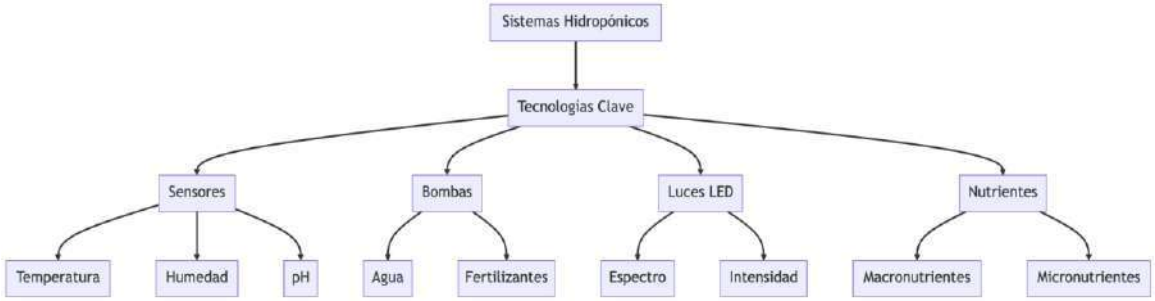


Figura 4. Diagrama de las Tecnologías clave más implementadas en Sistemas Hidropónicos.

4.2 Iluminación Artificial

La iluminación artificial es una de las tecnologías más críticas en sistemas hidropónicos, especialmente en entornos donde la luz solar es insuficiente. La iluminación adecuada es esencial para la fotosíntesis y, por lo tanto, para el crecimiento óptimo de las plantas.

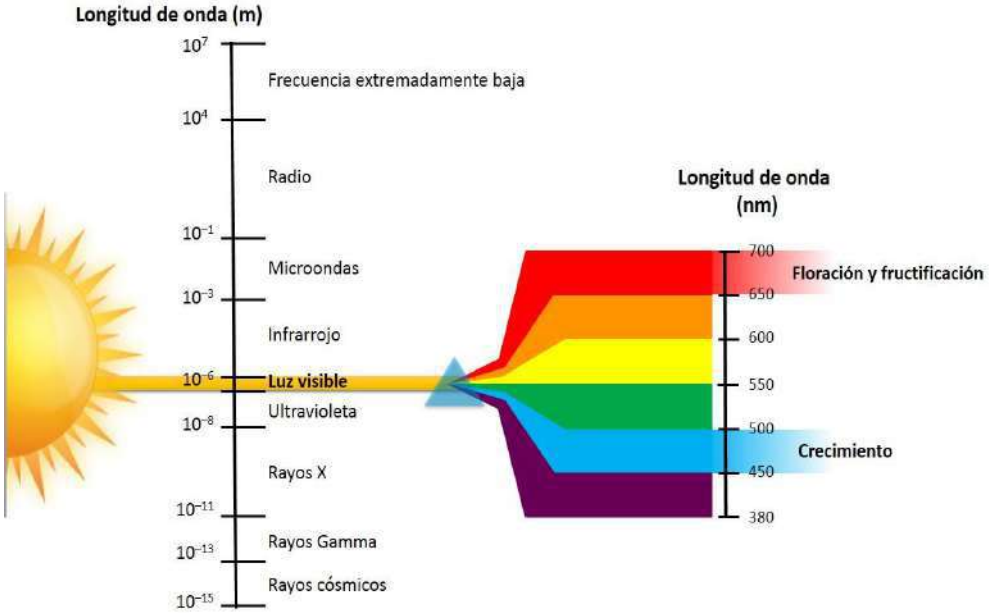


Figura 5. Diagrama de la longitud de onda óptima para el cultivo de plantas [53].

4.2.1 Uso de luces LED para optimizar el crecimiento

Las luces LED (diodos emisores de luz) se han convertido en la opción preferida para la iluminación en hidroponía debido a su eficiencia energética y capacidad para emitir luz en diferentes espectros. Estas luces pueden programarse para emitir longitudes de onda específicas que son beneficiosas para diferentes etapas del ciclo de vida de la planta, desde la germinación hasta la floración [20].

4.2.2 Espectros y ciclos de iluminación para diferentes cultivos

El espectro de iluminación y los ciclos de luz/oscuridad pueden variar según el tipo de cultivo. Por ejemplo, las plantas de hoja verde como la lechuga pueden requerir un espectro de luz diferente al de las plantas frutales como el tomate. La tecnología actual permite programar estos parámetros de forma precisa, lo que resulta en un crecimiento óptimo y mayor producción [21]. Ver figura 5.

4.3 Monitoreo y Análisis de Datos

El monitoreo y análisis de datos en hidroponía es esencial para garantizar el crecimiento óptimo de las plantas y optimizar la producción. Las tecnologías modernas permiten a los agricultores recopilar, analizar y actuar sobre los datos en tiempo real.

4.3.1 Herramientas de análisis de datos y software específicos

Las herramientas de análisis de datos permiten a los agricultores interpretar y comprender los datos recopilados de sus sistemas hidropónicos. Estas herramientas pueden identificar tendencias, predecir problemas y ofrecer soluciones basadas en datos históricos y en tiempo real. Además, el uso de software específico, como sistemas SCADA, permite un control y monitoreo centralizado de múltiples variables en el sistema hidropónico [22]. Ver figura 6.

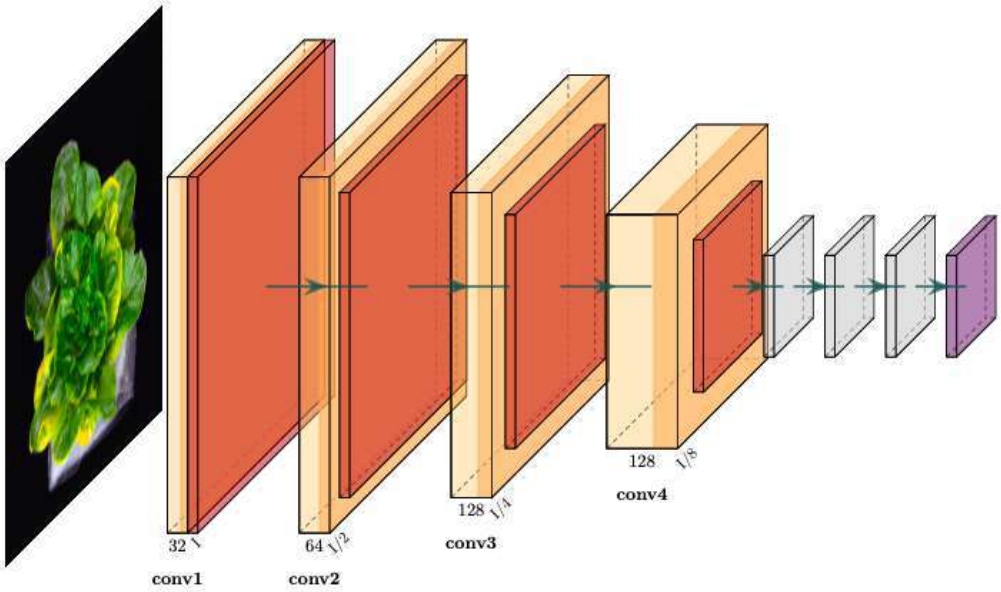


Figura 6. Ejemplo del análisis de una base de datos de fotografías de lechugas, para entrenar una Red Neuronal que pueda identificar si la lechuga está sana o desnutrida.

4.3.2 Técnicas de Machine Learning e Inteligencia Artificial para optimizar el rendimiento de los cultivos

1. **Predicción de Rendimiento**: Algoritmos de ML pueden analizar datos históricos para predecir el rendimiento de los cultivos en diferentes condiciones, permitiendo a los agricultores tomar decisiones informadas sobre cuándo plantar o cosechar.
2. **Optimización de Riego**: La IA puede analizar datos en tiempo real de sensores de humedad y temperatura para ajustar automáticamente los sistemas de riego, asegurando que las plantas reciban la cantidad adecuada de agua.
3. **Control de Plagas y Enfermedade**s: Algoritmos de reconocimiento de imágenes pueden identificar signos tempranos de plagas o enfermedades, permitiendo intervenciones tempranas y más efectivas.
4. **Automatización de la Nutrición**: Sistemas de IA pueden monitorear los niveles de nutrientes en el suelo o en soluciones hidropónicas y ajustar automáticamente la mezcla de nutrientes necesarios para optimizar el crecimiento de las plantas.
5. **Análisis de Datos Multivariados**: Técnicas de aprendizaje profundo pueden analizar múltiples variables simultáneamente (como la luz, la temperatura, la humedad, etc.) para encontrar patrones complejos que podrían no ser evidentes para un humano.

6. **Simulación y Modelado**: La IA puede simular diferentes escenarios de crecimiento en un entorno controlado virtual, lo que permite a los agricultores experimentar con diferentes variables sin el riesgo de afectar los cultivos reales.
7. **Monitoreo en Tiempo Real**: La IA y el ML permiten un monitoreo en tiempo real de todas las variables del invernadero, lo que facilita la toma de decisiones rápidas y fundamentadas. Ver figura 7.

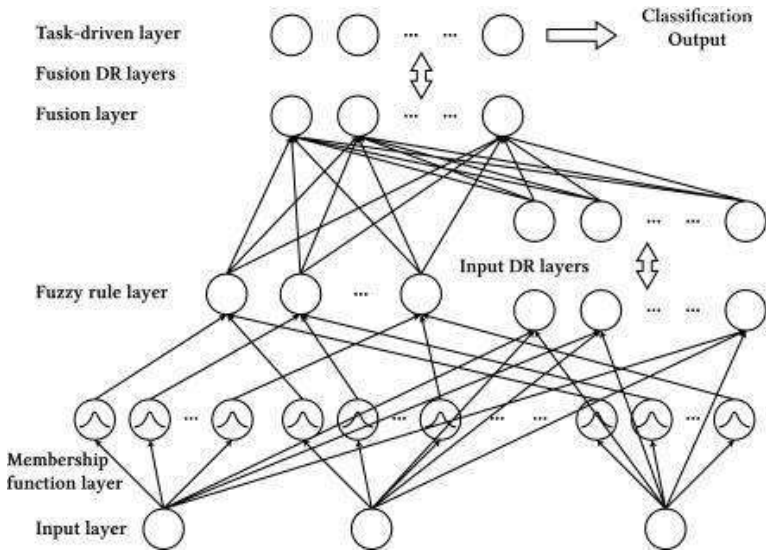


Figura 7. Ejemplo de la arquitectura de un entrenamiento de clasificación con Machine Learning, donde se integra Lógica Difusa para la automatización de toma de decisiones en tiempo real.

Estas aplicaciones de IA y ML tienen el potencial de revolucionar la agricultura hidropónica, haciendo que los sistemas sean más eficientes, sostenibles y rentables [23].

4.4 Tecnologías de comunicación

Con la incorporación de tecnologías modernas de comunicación, la hidroponía se ha beneficiado de una mejora en la arquitectura de automatización, monitorización y análisis de procesos a distancia. A continuación, se describen algunas de las tecnologías clave y cómo se aplican en sistemas hidropónicos:

4.4.1 Integración de Internet de las Cosas (IoT) en sistemas hidropónicos

El Internet de las Cosas (IoT) ha cambiado la manera en la que se controlan y monitorean los sistemas hidropónicos. Los dispositivos IoT permiten la recopilación de datos en tiempo real desde múltiples sensores y actuadores, lo que facilita la toma de decisiones basada en datos [24]. Un ejemplo de esto es mediante el uso de sensores, éstos son capaces de medir variables como el nivel de una solución nutritiva (SN), la humedad, la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica (EC, por sus siglas en inglés de "Electric Conductivity"), entre otros. Los datos recolectados por los sensores se analizan para mejorar la toma de decisiones, optimizar el uso de consumibles y/o mejorar la calidad del monitoreo o el control [25].

4.4.2 Uso de aplicaciones móviles y plataformas en línea para monitoreo y control

Las aplicaciones móviles y las plataformas en línea se han convertido en herramientas esenciales para el monitoreo y control de sistemas hidropónicos. Estas permiten a los agricultores analizar datos en tiempo real para poder tomar mejores decisiones sobre el uso de consumibles durante la nutrición, el riego, la iluminación, entre otras variables involucradas en el cultivo [26]. Además, algunas

aplicaciones ofrecen funcionalidades avanzadas como alertas y notificaciones, lo que ayuda a prevenir problemas antes de que se conviertan en crisis [27].

Figura 8. Ejemplo de la integración del Internet de las Cosas en un Sistema Hidropónico [54].

4.5 Sistemas de recirculación y filtración

La gestión eficiente del agua es uno de los desafíos más importantes en la agricultura moderna, y la hidroponía no es una excepción. Los sistemas de recirculación y filtración son tecnologías clave que abordan este desafío, permitiendo un uso más sostenible de los recursos hídricos en sistemas hidropónicos.

4.5.1 Técnicas avanzadas para reciclar y filtrar el agua en sistemas hidropónicos cerrados

Los sistemas hidropónicos cerrados, también conocidos como sistemas de recirculación, reutilizan el agua y los nutrientes, lo que reduce significativamente el desperdicio. Estos sistemas emplean técnicas avanzadas de filtración para eliminar sólidos y patógenos del agua reciclada. La filtración mecánica y la biofiltración son dos de las técnicas más comunes utilizadas para este propósito [28,29].

4.5.2 Impacto en la sostenibilidad y reducción del uso del agua

La implementación de sistemas de recirculación y filtración tiene un impacto positivo en la sostenibilidad de la hidroponía. Estos sistemas pueden reducir el consumo de agua en hasta un 90% en comparación con los métodos tradicionales de cultivo [30]. Además, la recirculación permite una mejor gestión de los nutrientes, lo que reduce la cantidad de fertilizantes necesarios y minimiza el impacto ambiental [31].

4.6 Otras tecnologías emergentes

Como ya se mencionó antes, la hidroponía ha experimentado un rápido desarrollo en los últimos años y, una de las áreas más emocionantes de innovación, es la incorporación de tecnologías emergentes como la Realidad Virtual (RV), la Realidad Aumentada (RA) y la robótica.

4.6.1 Realidad Virtual y Realidad Aumentada en hidroponía

La Realidad Virtual y la Realidad Aumentada están comenzando a encontrar aplicaciones en la hidroponía. Estas tecnologías pueden mejorar la visión real añadiendo datos virtuales a la realidad, lo

que puede ser especialmente útil en la formación y en la toma de decisiones [32]. Por ejemplo, la RA podría superponer información sobre los niveles de nutrientes y humedad directamente en la vista del operador, lo que facilita el monitoreo en tiempo real [33].

4.6.2 Robótica y drones en la supervisión y mantenimiento de cultivos

La robótica y los drones están ganando terreno en la hidroponía, especialmente en la supervisión y el mantenimiento de cultivos. Los drones equipados con cámaras y sensores pueden realizar vuelos sobre las instalaciones hidropónicas para recopilar datos, lo que es particularmente útil en sistemas a gran escala [34]. Además, los robots pueden ser programados para realizar tareas como la poda, la recolección y la aplicación de nutrientes, lo que reduce la necesidad de intervención humana [35].

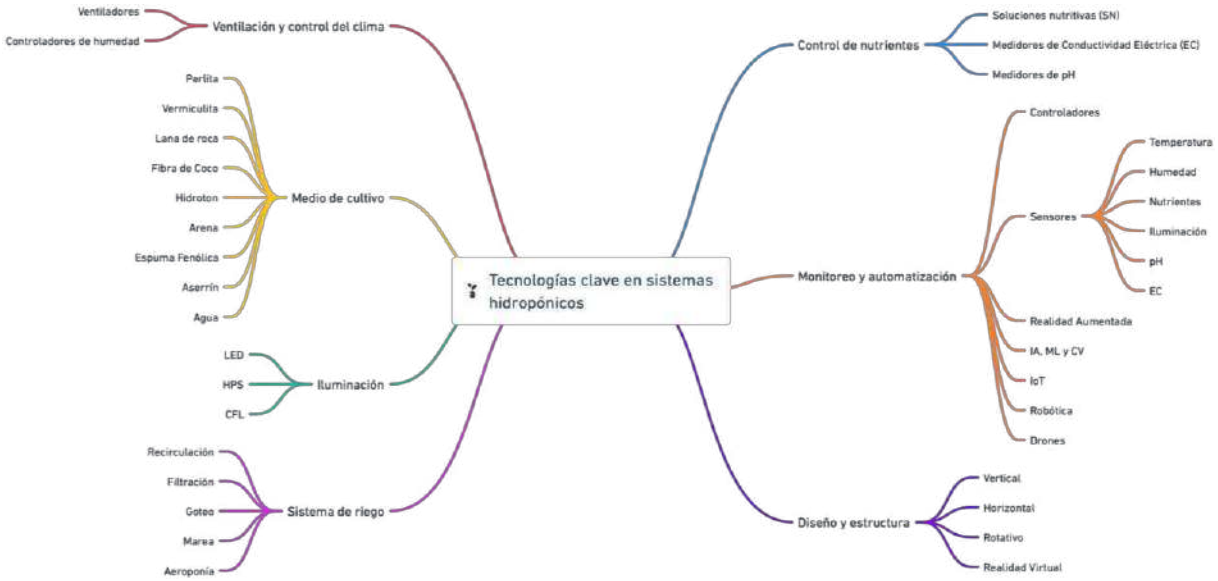


Figura 9. Diagrama de las Tecnologías utilizadas en Sistemas Hidropónicos.

5. Casos de estudio

La aplicación de tecnologías emergentes en sistemas hidropónicos ha demostrado ser un factor clave para el éxito en la producción agrícola moderna. A continuación, se presentan varios casos de estudio que ilustran cómo la tecnología ha sido aplicada con éxito en sistemas hidropónicos.

5.1 Exposición de casos reales donde la tecnología ha sido aplicada con éxito en sistemas hidropónicos

5.1.1 Caso de Estudio 1: Sistema Hidropónico Automatizado para Huertos Urbanos

En Marruecos, se implementó un sistema hidropónico automatizado que utiliza tecnología Arduino para el control de parámetros de solución nutritiva en huertos urbanos. Este sistema ha demostrado ser eficaz en la optimización de la producción y la reducción del uso de recursos [37].

5.1.2 Caso de Estudio 2: Diseño y Desarrollo de Sistemas Hidropónicos en Invernaderos Educativos

Un proyecto en Bolivia se centró en el diseño y desarrollo de sistemas hidropónicos hortícolas para implementación en invernaderos de unidades educativas. El proyecto no solo mejoró la producción sino que también sirvió como una herramienta educativa efectiva [38].

5.1.3 Caso de Estudio 3: Sistema Hidropónico NFT para Cultivo de Lechuga

En la ciudad de Arequipa, se implementó un sistema hidropónico Nutrient Film Technique (NFT) para mejorar la productividad del cultivo de lechuga. Los resultados mostraron un aumento significativo en la producción en comparación con los métodos tradicionales [39].

5.1.4 Caso de Estudio 4: Veritable Garden

El jardín CONNECT Véritable® es un jardín interior inteligente y conectado. Su aplicación gratuita dedicada permite seguir el desarrollo de las plantas, elegir el modo de iluminación y ser advertido cuando el tanque de agua está vacío [40].

5.1.5 Caso de Estudio 5: Huvster

Huvster tiene el objetivo de poder cultivar grandes cantidades de vegetales, en un espacio pequeño, por medio de un sistema de cultivo de aeroponia vertical dentro de un contenedor de carga de 40 pies (30 m2) capaz de producir 200 veces más vegetales por m2, en cualquier clima, región o temporada del año, ahorrando hasta 90 % de agua y completamente automatizado, acercando la agricultura a todos [41].

5.1.6 Caso de Estudio 6: Click and Grow

Click & Grow® construye jardines inteligentes que cierran la brecha entre la vida moderna y la naturaleza [42].

Los jardines inteligentes permiten cultivar plantas los 365 días del año incluso en los hogares más ocupados. Se encargan del riego, la luz y los nutrientes, mientras el usuario cosecha los beneficios [42].

5.1.7 Caso de Estudio 7: AeroGarden

El nuevo AeroGarden® Bounty Basic es un sistema de jardín en casa completamente contenido, que entrega automáticamente todo lo que las plantas necesitan para prosperar. Perfecto para verduras altas, como tomates de tamaño completo y pimientos morrones dulces [43].

5.1.8 Caso de Estudio 8: ēdn

- **Jardín inteligente**: La aplicación ēdn ofrece orientación sobre jardinería para que el usuario pueda cultivar con confianza (solo disponible para iOS 13 o superior).
- **No se requiere luz solar**: La iluminación LED automática proporciona toda la luz que las plantas necesitan.
- **Crecimiento limpio**: Las SeedPods están precargadas con semillas y alimento vegetal de liberación prolongada.
- **Alertas de agua**: Cuando a las plantas les falta agua, se le notifica al usuario en la aplicación ēdn [44].

"How it works". *dn*. Accessed: Nov. 21, 2021. [Online]. Available: https://www.edntech.com/pages/smallgarden

"Huvster". *Verde Compacto*. Consultado: 21 de Nov. de 2021. [En línea]. Disponible: https://verdecompacto.com/huvster/

"The Wall Farm Indoor Vertical Garden". *Click and Grow*. Accessed: Nov. 21, 2021. [Online]. Available: https://www.clickandgrow.com/products/wall-farm-indoor-vertical-garden

"CONNECT Veritable® Garden". *Veritable® Garden*. Accessed: Nov. 21, 2021. [Online]. Available: https://www.veritable-garden.com/indoor-gardens/182-connect-veritable-garden.html

Figura 10. Ejemplos de empresas que venden productos y/o servicios relacionados a la hidroponía semi-automatizada.

5.2 Lecciones aprendidas y recomendaciones

1. **Adopción de Tecnología**: La adopción de tecnologías avanzadas puede resultar en mejoras significativas en la eficiencia y la productividad [47,48,49].
2. **Educación y Formación**: La implementación de sistemas hidropónicos en entornos educativos puede ser una excelente manera de fomentar el interés y la comprensión de la agricultura sostenible [48].
3. **Personalización**: Los sistemas hidropónicos deben ser personalizables para adaptarse a las necesidades específicas de diferentes cultivos y entornos [49].
4. **Independencia de insumos**: En la mayoría de las empresas, que ofrecen al público general sistemas hidropónicos para uso doméstico, proveen al usuario de cápsulas con una semilla y tierra nutrida, esto garantiza que la semilla germinará, pero limita al usuario al tipo de planta que va a sembrar (debido a que la variedad no es mucha) y convierte al usuario dependiente de sus insumos, ya que sin las cápsulas es imposible usar el sistema. Por lo que un sistema hidropónico que permita al usuario sembrar sus propias semillas y elegir el tipo de solución nutritiva, abriría las puertas a que cualquier persona, sin importar su ubicación geográfica, pueda cultivar las especies de semillas que existen en su entorno.

6. Impacto ambiental y sostenibilidad

La hidroponía, como método de cultivo, ha sido objeto de numerosas innovaciones tecnológicas con el objetivo de mejorar la eficiencia y la sostenibilidad. Sin embargo, es crucial evaluar el impacto ambiental de estas tecnologías para asegurar un desarrollo sostenible.

6.1 Evaluación del aporte de las tecnologías a la reducción del impacto ambiental

1. **Sistemas de Recirculación**: Estos sistemas permiten el reciclaje del agua y los nutrientes, lo que reduce significativamente el desperdicio y el impacto ambiental [45].

2. **Monitoreo Remoto**: La implementación de tecnologías inalámbricas para el monitoreo remoto de variables ambientales en cultivos hidropónicos contribuye a una gestión más eficiente de los recursos [46].
3. **Sistemas Acuapónicos**: Estos sistemas combinan la acuicultura con la hidroponía, lo que resulta en un uso más eficiente del agua y una reducción del impacto ambiental [47].

6.2 Consideraciones sobre el uso responsable de recursos y energía

1. **Energía Renovable**: La adopción de fuentes de energía renovable para alimentar los sistemas hidropónicos puede reducir significativamente la huella de carbono [48].
2. **Gestión de Residuos**: Es crucial implementar prácticas de gestión de residuos para minimizar la contaminación del suelo y del agua [49].
3. **Eficiencia Energética**: La optimización de los sistemas de iluminación y ventilación puede resultar en un menor consumo de energía [50].

7. Conclusiones

Este estudio ha abordado la transformación tecnológica en la hidroponía, destacando la implementación de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo en tiempo real de variables críticas, y el uso de algoritmos de aprendizaje automático para la optimización de recursos. Se ha demostrado que la integración de estas tecnologías puede resultar en una mejora cuantificable en la eficiencia del uso del agua y en la productividad de los cultivos.

Además, se han identificado desafíos clave para la adopción de estas tecnologías, incluyendo barreras económicas y la necesidad de conocimientos técnicos especializados. Estos desafíos representan áreas para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos, con el objetivo de facilitar una adopción más amplia de sistemas hidropónicos tecnológicamente avanzados.

Se ha observado también que, a pesar de los avances tecnológicos, aún existen brechas en la automatización completa de sistemas hidropónicos y en la integración de múltiples tecnologías, como la lógica difusa y la inteligencia artificial. Estas brechas representan oportunidades para futuras investigaciones interdisciplinarias.

En resumen, la modernización tecnológica en la hidroponía no solo ha mejorado la eficiencia y la productividad, sino que también ha planteado nuevos desafíos y oportunidades para la investigación. La superación de estos desafíos será crucial para el futuro de la hidroponía como una solución sostenible para la producción de alimentos.

8. Recomendaciones para futuras investigaciones

Integración de Tecnologías Emergentes: A medida que avanzan las tecnologías de Inteligencia Artificial y Machine Learning, existe un potencial significativo para su integración en sistemas hidropónicos, permitiendo una mayor automatización y adaptabilidad a las condiciones cambiantes.

Desarrollo de Sistemas Modulares: La creación de sistemas hidropónicos modulares y escalables puede permitir una implementación más rápida y personalizada, adaptándose a las necesidades específicas de diferentes comunidades o negocios.

Investigación en Nutrientes y Sustratos: Aunque la hidroponía ha avanzado significativamente, aún hay espacio para investigar y desarrollar soluciones nutritivas más eficientes y sustratos alternativos que puedan mejorar el rendimiento de los cultivos.

Educación y Capacitación: Dada la importancia de la hidroponía en la educación, se pueden desarrollar programas específicos para formar a la próxima generación de agricultores hidropónicos, enfocándose en tecnologías avanzadas y sostenibilidad.

Estudios de Impacto Ambiental: A medida que la hidroponía se expande, es esencial realizar estudios detallados sobre su impacto ambiental a largo plazo, garantizando que su crecimiento sea sostenible y beneficioso para el planeta.

Referencias

[1] U. Debangshi, "Hydroponics – An Overview," *Zenodo*, Oct. 06, 2021. https://zenodo.org/record/5552644
[2] S. B. Dhal *et al.*, "An IoT-Based Data-Driven Real-Time Monitoring System for Control of Heavy Metals to Ensure Optimal Lettuce Growth in Hydroponic Set-Ups," *Sensors*, vol. 23, no. 1, p. 451, Jan. 2023, doi: 10.3390/s23010451.
[3] A. A. Castañeda, "Creación de cultivo hidropónico en el huerto universitario Muilitaj," May 01, 2022. https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/4530
[4] A. P. B. Cock, G. L. C. Vasquez, S. D. Rzewuski, J. J. O. Ruiz, and J. A. P. Yarleque, "Diseño de sistemas hidropónicos modulares para los hogares de la ciudad de Piura," Jan. 25, 2022. https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/5415
[5] "A Brief Overview of the History Of Hydroponics," *Garden Culture Magazine*, Feb. 08, 2021. https://gardenculturemagazine.com/a-brief-overview-of-the-history-of-hydroponics/ (accessed Sep. 22, 2023).
[6] "Las chinampas, un antiguo y eficiente sistema de producción de alimentos," *gob.mx*. https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/la-agricultura-en-chinampas (accessed Sep. 22, 2023).
[7] A. A. A. Alcivar, "Efecto de sustancias minerales altamente diluidas aplicadas al cultivo de albahaca (Ocimum basilicum) en un sistema hidropónico," *Quevedo-Ecuador*, 2022.
[8] L. A. V. Miguez, "Tecnologías aplicadas en los procesos de crianza, calidad y rendimiento del ganado bovino en el Ecuador," 2022. Accessed: Sep. 22, 2023. [Online]. Available: http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13285
[9] INTAGRI S.C., "La Industria de los Cultivos Hidropónicos," *Intagri*, p. 4, 2017. Accessed: Sep. 25, 2023. [Online]. Available: https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/la-industria-de-los-cultivos-hidroponicos
[10] J. E. T. Baena, "Análisis del estado del arte del internet de las cosas aplicado a cultivos aeropónicos e hidropónicos a nivel nacional e internacional," Dec. 24, 2021. https://repository.unad.edu.co/handle/10596/44574
[11] C. E. Cevallo Terán, "Vicerrectorado de Investigación, Innovación Y Transferencia de Tecnología Centro de Postgrados," PDF, Universidad de las Fuerzas Armadas, 2017. [Online]. Available: https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/13657/1/T-ESPE-053911.pdf
[12] Sociedad Brasileña para el Progreso de la Ciencia, "Programação SBPC Jovem da 71a Reunião Anual da SBPC," in *Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS)*, Campo Grande, 2019. Accessed: Sep. 22, 2023. [Online]. Available: https://sbpcacervodigital.org.br/bitstream/20.500.11832/5218/1/71RA_SBPCJovem.pdf
[13] A. A. D. Tafet, "Mayores rendimientos agrícolas utilizando como método de cultivo el sistema hidropónico," 2022. Accessed: Sep. 22, 2023. [Online]. Available: http://190.221.29.250/handle/123456789/10114
[14] C. R. Walter, "Análisis del comportamiento poblacional de las plagas en un cultivo hidropónico de tomate bajo un manejo integrado de plagas con productos biorracionales.," *hdl:20.500.12010/28122*, Jan. 2021.
[15] "Integración de tecnología en invernadero de la finca." https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/3028 (accessed Sep. 06, 2023).
[16] "Diseño Y Prototipo Electrónico Para Un Huerto Hidropónico En Apartamento Operando Para El Conjunto Residencial La," Universidad Nueva España, 2022. Accessed: Sep. 06, 2023. [Online]. Available: http://miunespace.une.edu.ve/jspui/handle/123456789/3734
[17] J. A. S. Ramos, R. T. A. Santos, R. J. M. Barragan, O. A. Cardenas, and M. G. M. Baldivia, "Sistema

automatizado de monitorización y control para cultivos hidropónicos," *Difu100ci@, Revista de difusión científica, ingeniería y tecnologías*, vol. 15, no. 3, pp. 88–93, Dec. 2021.

[18] C. C. Baseca, S. Sendra, J. M. Jiménez, and J. Lloret, "Red de Sensores Inalámbricos de Bajo Consumo Energético en Agricultura Hidropónica," *Universidad de Burgos*, Sep. 01, 2017. https://riubu.ubu.es/handle/10259/7264

[19] D. A. Galvis Alzate, "Descripción de los sistemas autorizados y las tecnologías empleadas en el manejo de un cultivo hidropónico de tomate (Solanum lycopersicum)," PDF, Sociedad Colombiana de Ciencias Horticolas, 2017. Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/bitstream/handle/20.500.12558/1705/DESCRIPCIÓN%20DE%20LOS%20SISTEMAS%20AUTOMATIZADOS%20Y%20LAS%20TECNOLOGÍAS%20EMPLEADAS%20EN%20EL%20MANEJO%20DE%20UN%20CULTIVO%20.pdf?sequence=1

[20] A. Frutos Tortosa, "Revisión de nuevas técnicas de producción para cultivos de hoja," *Revista Doctorado UMH*, vol. 4, no. 1, Jan. 2018, doi: 10.21134/doctumh.v4i1.1489.

[21] A. D. Ponce, A. V. E. Loera, L. M. A. Valeria, M. O. Morales, I. T. Zúñiga, and M. M. Guzmán, "Sistema agrovoltaico para el estudio y comparación de técnicas de cultivo de hortalizas," *Energías Renovables*, vol. 8, no. 45, Jan. 2022, doi: 10.59730/rer.v8n45a2.

[22] S. A. L. Ortiz, J. G. V. Luzuriaga, F. Gunzha, E. Freire, and M. Pujos, "Automatización del control de nutrientes en hidroponía mediante el uso de un sistema embebido," *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, vol. 7, no. 7, pp. 814–826, Jan. 2022.

[23] V. Olvera Rodríguez, "Invernadero hidropónico automatizado en riego, con monitoreo de pH, conductividad eléctrica y control de variables climáticas," Tésis, Universidad Autónoma de México (UNAM), 2016. [Online]. Available: https://www.repositorioinstitucionaluacm.mx/jspui/bitstream/123456789/365/3/VERONICA%20OLVERA%20RODRIGUEZ_ISEI_unlocked.pdf

[24] J. P. B. Sinchico, "Diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos definidos por software para el monitoreo de un sistema hidropónico NFT," *UTN*, Feb. 2022.

[25] E. F. García-Cabezas, J. C. Moyano-Alulema, H. F. M. Naranjo, J. M. Orozco-Ramos, and C. J. Santillán-Mariño, "Sistemas embebidos open source para la caracterización de la humedad en un cultivo hidropónico de fresa por la variación climática," *Polo del Conocimiento*, vol. 4, no. 4, Apr. 2019, doi: 10.23857/pc.v4i4.941.

[26] G. H. T. Cortes, "Diseño e implementación de un sistema de adquisición y registro de señales e imágenes con tecnología IoT para el seguimiento de las condiciones de cultivos hidropónicos de lechuga," Jan. 01, 2021. https://dspace-escuelaing.metacatalogo.com/handle/001/1635 (accessed Sep. 25, 2023).

[27] G. H. T. Cortes, "Diseño e implementación de un sistema de adquisición y registro de señales e imágenes con tecnología IoT para el seguimiento de las condiciones de cultivos hidropónicos de lechuga," Jan. 01, 2021. https://dspace-escuelaing.metacatalogo.com/handle/001/1635 (accessed Sep. 25, 2023).

[28] A. F. A. Tenelema, "Sistema hidropónico inteligente aplicado a la producción del forraje verde con arquitectura IoT," Sep. 01, 2022. http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/36511 (accessed Sep. 25, 2023).

[29] A. F. A. Tenelema, "Sistema hidropónico inteligente aplicado a la producción del forraje verde con arquitectura IoT," Sep. 01, 2022. http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/36511 (accessed Sep. 25, 2023).

[30] L. Fontanini, C. Kubach, and M. C. Valentinuzzi, "PRÁCTICAS DE CULTIVO SIN SUELO EN SISTEMA ACUAPÓNICO. PUESTA A PUNTO DE UN MÓDULO EN EL CAMPO ESCUELA," *Nexo agropecuario*, vol. 10, no. 2, pp. 26–31, Dec. 2022.

[31] M. M. Mesa, "Sistemas de acuaponia artesanal y eficiencia productiva de trucha en sistemas de recirculación en tanques circulares de geomembrana.," Jan. 01, 2021. http://repository.unilasallista.edu.co/dspace/handle/10567/2956

[32] Adelina, "TESIS DE MAESTRIA YENITZE ELIZABETH FIMBRES ACEDO - MARZO 2015.pdf." Accessed: Sep. 25, 2023. [Online]. Available: http://dspace.cibnor.mx:8080/bitstream/handle/123456789/462/fimbres_y.pdf?sequence=1

[33] D. L. C. Villanueva, "Tratamiento De Aguas Residuales Provenientes De La Crianza De Tilapias (Oreochromis Niloticus) A Tráves Del Sistema Acuapónico De Recirculación Utilizando Cultivos De Lechuga (Lactuca Sativa Var. Intybacea), Albahaca (Ocimum Basilicum) Y Acelga (Beta Vulgaris

Var. Cicla)," Jan. 01, 2019. http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/216
[34] M. E. Romo, "Planeación Académica Estratégica," UAG. Accessed: Sep. 25, 2023. [Online]. Available: http://cmapspublic.ihmc.us/rid=1MF2J1018-2940K7B-3TMT/informeresultadosFINALAL05122013.pd
[35] "Industrias Creativas: Desafíos y Oportunidades para la Economía del Sur Mendocino," Tésis. [Online]. Available: http://tesisenfermeria.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/17935/diaz-fce.pdf
[36] SBPC, "Programação SBPC Jovem da 71a Reunião Anual da SBPC," in *Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS)*, Campo Grande, Jun. 2019. Accessed: Sep. 25, 2023. [Online]. Available: https://sbpcacervodigital.org.br/bitstream/20.500.11832/5218/1/71RA_SBPCJovem.pdf
[37] "Sistema hidropónico automatizado para el control de parámetros de solución nutritiva en huertos urbanos," *https://www.researchgate.net/publication/335159223_Robotica_en_la_Agricultura_Aplicaciones_y_Desafios*, Jan. 2002.
[38] G. A. Mendoza and L. C. Rodríguez, "Diseño y Desarrollo de Sistemas Hidropónicos Hortícolas, para Implementación e Incremento de la Producción en Invernaderos de Unidades Educativas en el Municipio de Papel Pampa," Jan. 01, 2015. https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/22250
[39] M. A. H. Ticona and M. A. R. Allpan, "Sistema hidropónico Nutrient Film Technique (NFT) para mejorar la productividad del cultivo de lechuga en la agricultura familiar en la ciudad de Arequipa," Jan. 01, 2020. https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/4108
[40] "Veritable® Garden," *Véritable® SAS*. https://www.veritable-potager.fr/en/indoor-gardens/181-veritable-smart.html (accessed Sep. 25, 2023).
[41] "Inicio," *Verde Compacto*, Jun. 17, 2020. https://verdecompacto.com (accessed Sep. 25, 2023).
[42] "Indoor Herb Gardens and Indoor Gardening Kits," *Click & Grow*. https://www.clickandgrow.com (accessed Sep. 25, 2023).
[43] "AeroGarden: Indoor Gardens, Grow Lights, Seed Kits and More," *AeroGarden*. https://www.aerogarden.com (accessed Sep. 25, 2023).
[44] "ēdn," *ēdn*. https://www.edntech.com (accessed Sep. 25, 2023).
[45] D. Y. C. Campoverde, "Diseño de un sistema de huerto hidropónico mitigante de la contaminación ambiental y promotor de la soberanía alimentaria." https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/6605
[46] K. D. N. Viera, "Sistema de monitoreo remoto para mediciones de variables ambientales en cultivos hidropónicos con tecnología inalámbrica Zigbee," Jan. 01, 2019. https://repositorio.unp.edu.pe/handle/20.500.12676/2597
[47] G. A. G. Castillo and D. R. P. Peñaloza, "Sistema acuaponico como alternativa sustentable para la agricultura y la piscicultura actual," Dec. 02, 2019. https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/2438
[48] A. A. D. Tafet, "Mayores rendimientos agrícolas utilizando como método de cultivo el sistema hidropónico," Jan. 01, 2022. http://190.221.29.250/handle/123456789/10114
[49] C. E. Cevallos Terán, "Vicerrectorado de Investigación, Innovación Y Transferencia de Tecnología Centro de Postgrados," Tésis, ESPE, 2017. [Online]. Available: https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/13657/1/T-ESPE-053911.pdf
[50] "Eficiencia Energética en Sistemas Hidropónicos", doi: https://www.researchgate.net/publication/335159223_Eficiencia_Energetica_en_Sistemas_Hidroponico.
[51] L. A. V. Miguez, "Tecnologías aplicadas en los procesos de crianza, calidad y rendimiento del ganado bovino en el Ecuador," 2022. [Online]. Available: http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13285
[52] E. Levetin and K. McMahon, *Plants and Society*. McGrowHill, 1999.
[53] "Iluminación," *Hidroponía al cubo*, Apr. 23, 2017. https://hidroponiaalcubo.wordpress.com/iluminacion/ (accessed Sep. 25, 2023).
[54] A. M. Patokar and V. V. Gohokar, "Precision Agriculture System Design Using Wireless Sensor Network," in *Information and Communication Technology*, Singapore: Springer Singapore, 2017, pp. 169–177. Accessed: Sep. 25, 2023. [Online]. Available: https://www.rcs.cic.ipn.mx/2019_148_10/Propuesta%20de%20sistema%20de%20gestion%20inteligente%20basado%20en%20IoT%20para%20hidroponia.pdf

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 37, pp. 481 – 492
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Optimización topológica por estructuras reticulares en robot submarino para inspección con técnicas no destructivas

Godínez Trinidad Daniel A., Ramírez Martínez Antonio y Salgado Jiménez Tomás

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), México.
d.godinez@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen

En este trabajo se muestra la metodología de la optimización topológica de estructuras reticulares para la construcción de los componentes estructurales para un robot submarino ROUV (Vehículo sumergible de operación remota) empleando el software nTopology, usando el método de homogeneización en dos diferentes estructuras reticulares Octeto y Triangular Honeycomb para encontrar los parámetros de fabricación de impresión 3D por el método de FDM (Modelado por Deposición Fundida), que proporcionen las mejores características mecánicas. El material empleado para la construcción del robot es el termoplástico ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene).

Palabras clave: Estructuras reticulares, ROUV, Manufactura Aditiva, nTopology.

1. Introducción

La Manufactura Aditiva (MA), también conocida como impresión 3D, ha irrumpido con fuerza en diversas industrias, revolucionando la forma en que se diseñan y producen componentes y estructuras. En el ámbito de la robótica submarina, esta tecnología ha abierto un nuevo horizonte de posibilidades y avances significativos. En este documento, mostraremos el análisis de las geometrías reticulares Octeto y Triangular Honeycomb con el método de Homogeneización para realizar optimización topológica en la estructura de un ROUV. La Homogeneización consiste en un método de modelado que simplifica materiales o estructuras heterogéneas en materiales equivalentes homogéneos con propiedades efectivas [1].

La aplicación de la optimización topológica es importante en el diseño porque se evalúan los elementos a cargas y presiones, para este trabajo en particular se utiliza el software nTopology. Este como cualquier otro software CAE (Computer Aided Engineering) permite realizar diseño generativo avanzado, generando automáticamente geometrías y estructuras optimizadas para cumplir con ciertos criterios de rendimiento como resistencia y ligereza, estos análisis numéricos también se pueden complementar con cálculos analíticos como en [2,6]. También se pueden obtener las deformaciones y esfuerzos en estructuras a nivel reticular, obteniéndose los elementos óptimos en densidad de la estructura [7]. Esta técnica consiste en redistribuir el material dentro de una pieza para cumplir con ciertos criterios de rendimiento estructural mientras se minimiza el peso y la cantidad del material. Con el uso de la técnica de estructuras reticulares se puede generar una estructura interna que asemeja una red.

Existen varias técnicas de impresión 3D, como lo son: estereolitografía (SLA), sinterización selectiva por láser (SLS), la fusión selectiva por láser (SLM), Modelado por deposición fundida (FDM) La técnica FDM es uno de los métodos más usados en la impresión 3D, donde se tienen diferentes parámetros de manufactura críticos, que se deben considerar para que no afecte la apariencia, la

resistencia, deformación en piezas y separación entre capas, las cual puede generar concentradores de esfuerzo o rotura de piezas. Existen investigaciones en las diferentes técnicas de impresión, donde se han estudiado parámetros como: temperatura de extrusión, temperatura de la cama de impresión, velocidad de impresión, altura de la capa, diámetro del filamento, flujo del material, porcentaje, geometría de relleno y orientación de la pieza. Estos estudios se han realizado principalmente en materiales como el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y el PLA (ácido poliláctico) como en [8,10], donde se describe cómo controlar esos parámetros.

La implementación de la manufactura aditiva tiene un impacto significativo en el desarrollo y la mejora de la tecnología de manufactura en la robótica submarina. Permitiendo realizar diseño personalizado, optimizado y como objetivo principal reducir el peso en componentes, esto ayuda al rápido desarrollo de prototipos, así como la reparación y el mantenimiento de piezas dañadas.

Otra característica importante a resaltar de la manufactura aditiva comparada con la manufactura convencional es que tiene reglas de proceso de fabricación de componentes menos estrictas aún cuando involucra todos los parámetros previamente mencionados, ya que es más fácil fabricar formas complejas sin costes adicionales, lo cual la hace perfecta para diseños de optimización topológica. Siendo utilizada en diversas aplicaciones e industrias para el análisis estructural siendo las principales aeroespacial [11], automotriz [12], entre otras.

La elección de la geometría del robot y sus materiales son puntos importantes para su desempeño, ya que estos influyen en su centro de gravedad y flotabilidad que inciden directamente en su estabilidad, lo cual afecta el funcionamiento del ROUV especialmente en la realización de trayectorias de inspección. Para la construcción en la categoría de inspección menor a los 100 metros de profundidad y de carga ligera, se puede hacer uso de la manufactura aditiva, como se ha visto en [13-15].

2. Materiales y métodos

En la ingeniería de diseño existe un problema clásico, el cual consiste en encontrar una configuración geométrica en un cuerpo que minimice la cantidad de material usado en su fabricación y que este satisfaga a su vez ciertas restricciones o condiciones de contorno del problema. Usualmente esta solución puede ser resuelta utilizando diferentes estrategias, una de ellas es la optimización topológica. “La optimización topológica es un método que usa algoritmos para optimizar la distribución del material dentro de un espacio definido por el usuario para un conjunto dado de cargas, condiciones y limitaciones. Su principal objetivo es el maximizar el rendimiento estructural del diseño eliminando el material sobrante de las zonas que no necesitan soportar cargas considerables para reducir peso“ [2]. Para lograr el máximo rendimiento estructural en el cálculo numérico en el software nTopology se debe generar el dominio, que es el espacio tridimensional al cual se le aplican cargas y presiones, para encontrar la mejor distribución de material en la estructura para cumplir con los requerimientos de trabajo, el software realiza modificaciones de la topología de la pieza, permitiendo obtener una configuración deseada partiendo de la morfología inicial.

2.1 Fundamentos del método homogeneización.

La homogeneización desde un enfoque matemático y teórico es utilizado en la física de materiales y la mecánica de medios continuos para estudiar el comportamiento de materiales compuestos, heterogéneos o micro estructurados a nivel macroscópico. Esta teoría se utiliza para entender cómo los efectos microscópicos o las heterogeneidades de un material se traducen en propiedades efectivas a nivel macroscópico, por lo que es usado principalmente en materiales que tienen una estructura interna compleja. Se sabe que cada material heterogéneo tiene una microestructura característica que consiste en pequeñas inclusiones, partículas, poros u otras discontinuidades distribuidas en un medio matriz, comúnmente llamada celda unitaria. La Homogeneización tiene en cuenta los efectos de escala, lo que significa que se investiga cómo cambian las propiedades efectivas a medida que cambiamos la escala

de observación. Esto es importante para entender cómo se comporta un material en diferentes condiciones y tamaños.

Así su principal objetivo es determinar las propiedades efectivas del material a nivel macroscópico, como pueden ser la resistencia mecánica, la elasticidad, entre otros. Estas propiedades efectivas se obtienen al considerar el comportamiento promedio del material a lo largo de su microestructura, por lo cual se utilizan métodos matemáticos y computacionales para desarrollar ecuaciones que relacionen las propiedades macroscópicas con las propiedades microscópicas del material. Estas ecuaciones se derivan a través de análisis asintóticos y técnicas de teoría de campos.

Para describir el comportamiento mecánico de estos materiales, se utilizan las ecuaciones de elasticidad Homogeneizada, con las cuales se calculan las tensiones y deformaciones efectivas en función de los componentes individuales y su celda unitaria. La descripción matemática e implementación se puede ver en [16,17].

Este comportamiento macroscópico se puede describir con la ley de Hooke generalizada relacionando las tensiones efectivas con las deformaciones. Las ecuaciones suelen tener la siguiente forma general para el caso de un material linealmente elástico:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\, \varepsilon_{kl} \tag{1}$$

Donde: σ_{ij} son las tensiones efectivas, ε_{kl} son las deformaciones efectivas. y C_{ijkl} Es el tensor de rigidez efectivo, que relaciona: tensiones y deformaciones. Este tensor se calcula a partir de las propiedades elásticas de las fases individuales y la geometría microscópica del material.

El tensor de rigidez efectivo se obtiene mediante métodos de Homogeneización, como el método de los campos medios o el método de las escalas múltiples, métodos numéricos que se basan en esta teoría como el que usa nTopology. Así las tensiones y deformaciones efectivas se relacionan mediante el tensor de rigidez efectivo, que tiene componentes que dependen de las propiedades elásticas de las fases individuales, sus fracciones de volumen y su distribución espacial.

También el método hace uso de ecuaciones de promedio, estas ecuaciones se utilizan para calcular propiedades efectivas del material, con la siguiente forma:

$$k_{efectiva} = \frac{1}{V} \int_V \quad k(x) dV \tag{2}$$

Donde $k_{efectiva}$ es la ecuación del tensor efectivo de rigidez, V es el volumen total del material y $k(x)$ es el tensor de rigidez local en un punto x dentro del material.

2.2 Descripción del robot

Para realizar las tareas de inspección es necesario definir un diseño de ROUV basado en ciertos requerimientos de diseño, condiciones ambientales y operación [18]. Algunos de ellos son la resistencia a la corrosión, profundidad de operación, maniobrabilidad, estabilidad y control, así como el cumplir con las normativas de inspección [19].

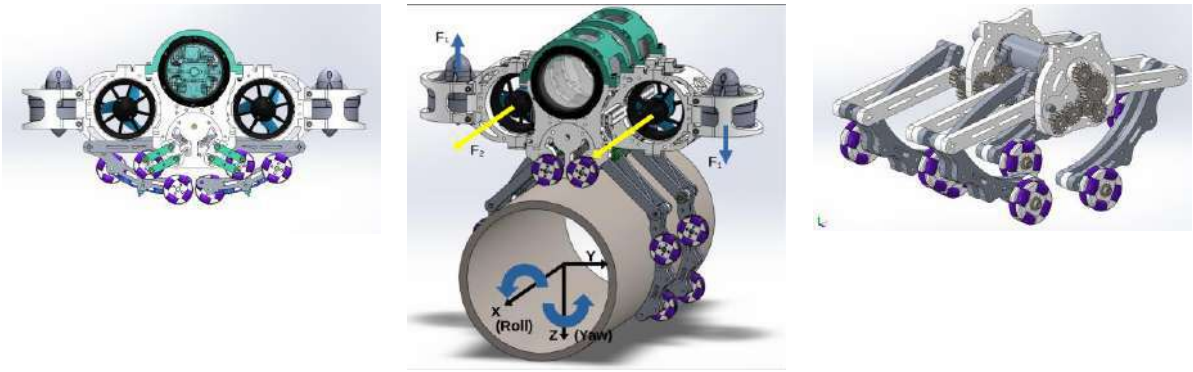
El robot está formado por un cilindro de 100 mm de diámetro por una longitud de 300 mm de material acrílico, con tapas herméticas de aluminio que resiste la presión hidrostática a 100 m de profundidad, en su interior se coloca la electrónica de control, comunicación y potencia. El control del robot se realiza por el protocolo de comunicación RS-484 Simplex en microcontroladores ATMEL Atmega328p de 16Mhz, donde el microcontrolador maestro recibe los comandos de mando, y el esclavo acciona los propulsores mediante un controlador de velocidad ESC 12V a 30A los cuales permiten que el propulsor cambie de dirección de giro. Se tiene una Raspberry pi 3B la cual transmite video 720p a 30 fps la cual recibe información del sensor de presión Bar 30 de Blue Robotics con resolución de

profundidad de 2 mm y de un IMU MPU6050 de 6 grados de libertad con el que se mide la inclinación del robot. Todos estos datos se pueden monitorear mediante VNC (Computación Virtual en Red) por cable umbilical que contiene un cable ethernet categoría 5 de comunicación, un cable para RS-485 y uno de alimentación eléctrica 24AWG. Para la alimentación eléctrica para la electrónica del ROUV, puede utilizarse una batería LiPo de 11.1V y 2100 mAh, la cual le da una autonomía al robot de 40 minutos, o bien por un cable ethernet con el cual puede trabajar por horas.

La estructura principal del robot está formada por 14 piezas. En la parte inferior cuenta con un mecanismo de acople tipo pinza de 4 brazos de 2 grados de libertad cada uno alojando un transductor de inmersión technosonic TS-1469-B-5, estos brazos se accionan en sincronía mediante 2 motores DC los cuales están contenidos en una carcasa hermética, cada uno acoplado a una caja de engranes rectos, este mecanismo tiene el fin de ayudar a la inspección por métodos no destructivos a tuberías de diámetros de 8 a 10 pulgadas, por tal motivo cuenta con un par de ruedas omnidireccionales por brazo y cuatro en la parte inferior, 2 a cada extremo de la estructura del robot, estas llantas tienen la función guiar al ROUV a realizar movimientos suaves de rotación y traslación longitudinal durante el acople a la tubería.

Es importante resaltar la distancia de operación *dso* (distancia de la cara del transductor y superficie) de los transductores respecto a la superficie a inspeccionar, el respetar éste parámetro es necesario para la correcta lectura de valores como se muestra en [20], cuyos valores están en el rango de separación de 15- 25 mm que aceptan con un ángulo de inclinación del transductor con respecto a la superficie de +/- 5°. Las dimensiones del robot son: alto 230 mm, ancho 570 mm y largo 350 mm. Cuenta con 4 propulsores T200 de la marca Blue Robotics, dos de ellos son para sumergirse-emerger en el eje Z y girar sobre X, los otros dos para avanzar-retroceder en el eje X y girar sobre Z, esto es suficiente para darle al robot 5 grados de libertad. El peso del cuerpo principal del ROV es de 6 kg, mientras que el peso del mecanismo de acoplamiento es de 2.7 kg.

En la Figura 1a se muestra un modelo CAD del diseño del ROUV con los brazos retraídos, esta configuración es la recomendada para el desplazamiento frontal, ya que para una configuración brazos extendidos, la fuerza de arrastre que golpea los brazos, le produce momentos de fuerza con respecto al centro de gravedad del cuerpo que lo desestabilizan. A diferencia de los ROUV´s de inspección de tuberías en altamar que hacen uso de otras herramientas para realizar la inspección, el ROUV que se presenta ya cuenta con el mecanismo de anclaje incorporado, esto facilita las operaciones de traslado, movilidad e inspección. En la Figura 1b se muestra el ROUV acoplado a la tubería para el proceso de inspección, en los propulsores laterales se aplicará una fuerza F1 la cual hará girar al robot sobre la tubería, mientras los propulsores horizontales aplican una fuerza F2 con la que se avanzara longitudinalmente. En la Figura 1c se muestra el mecanismo y la conexión de la flecha de los motores DC con el tren de engranajes.



a) b) c)

Figura 1. a) Vista frontal ROUV, b) ROUV acoplado a la tubería, c) Vista isométrica del mecanismo.

2.3 Elección de los materiales y diseño de la estructura.

La elección de los materiales de construcción de un ROUV es un tema importante, puesto que deben ser capaces de resistir las condiciones del entorno al que estarán sometidos, algunas consideraciones para el diseño del robot son: tamaño, capacidad de carga, peso, temperatura, profundidad de operación, impactos. La tabla 1 muestra los materiales más usados para la fabricación de los ROUV´s de acuerdo a la literatura [21, 22].

Tabla 1: Propiedades de los principales materiales usados en ROUV

Material	Tensión de rotura (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Densidad (kg/m^3)	Resistencia a la corrosión
Aluminio (6061)	310	70	2700	Bueno
Titanio (Ti-6AL-4V)	1000	110	4430	Excelente
ABS (inyección)	40	2.2	1050	Excelente
HDPE	35	1.6	957	Bueno

Se sabe que la elección de la manufactura impactará en el tiempo y costo de la fabricación del prototipo, se eligió la manufactura aditiva porque: permite realizar diseños de elementos complejos con menor desperdicio de materiales, flexibilidad de fabricación, posibilidad de manufactura de estructuras ligeras y optimizadas, entre otras ventajas. Estas ventajas se pueden aplicar en la fase de prueba de prototipo porque es la etapa donde se validan los requerimientos, realizando los ajustes, que normalmente involucra el ajuste de dimensiones de los elementos estructurales. Para la construcción de la estructura del robot, se eligió el termoplástico ABS por sus características mecánicas, como son: resistencia a la tensión de 28-55 MPa, resistencia a la compresión de 31-86 MPa, esta última se usa para evaluar el desempeño mecánico a estructuras entramadas [10, 11], resistencia química a la corrosión, su baja densidad y costo. Se puede señalar que este material usualmente es de fácil adquisición, dispone de múltiples colores además de su relativa facilidad de manufactura por FDM.

Uno de los principales problemas que se presentan en la manufactura aditiva, en especial para piezas usadas en el agua, es la porosidad entre las capas, lo que se traduce en la acumulación de cierta cantidad de agua en su interior (dependiendo de la densidad de relleno en el interior de la pieza), para resolver este problema se suelen usar diferentes técnicas de sellado, las más usadas para el ABS es el sellado con acetona o el recubrimiento con resinas.

Se realizaron pruebas bajo la norma D570-98 [23], para medir el porcentaje de absorción de agua de elementos fabricados con material ABS manufacturado por la técnica FDM, para su manufactura se usó la impresora Ultimaker 3 Extended, fabricando 6 probetas con relleno de 85% , a solo 3 probetas se les aplicó el recubrimiento de resina con la geometría interna reticulada triangular, en la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos.

abla 2: Valores de absorción de agua en probetas ABS

Descripción	% absorción de agua en 24 hrs
ABS 85%	1.7
ABS 85% con resina	0.21

En investigaciones relacionadas con la propiedad de absorción del ABS, se han reportado porcentajes de absorción similares, de 0.77% para probetas sólidas manufacturadas en 3D, y para probetas manufacturadas por inyección de 0.3%. De acuerdo a los resultados obtenidos al utilizar la norma mencionada, el valor de 1.7% se considera correcto por ser para una estructura reticular, el otro

valor de 0.21% es muy similar al de la pieza reportada que fue manufacturada por inyección, pero que la supera por contar con un recubrimiento que minimiza la cantidad de absorción de humedad.

2.3.1 Análisis de estructura reticular

Tomando de referencia el artículo [24], donde su objetivo fue comparar el efecto de 13 diferentes topologías de relleno reticular producidas con el software CURA, sobre las propiedades mecánicas del material utilizado en la impresión 3D, donde se debate sobre los tipos de geometrías de relleno y temperaturas de extrusión que pueden ser las mejores para ciertos usos para piezas funcionales y piezas flexibles. Se elige analizar con el método de homogeneización la geometría reticular Octeto y Triangular Honeycomb para realizar optimización topológica de piezas, con el objetivo de encontrar los parámetros de relleno que nos den las mejores propiedades mecánicas y reducir el peso en la fabricación del ROUV.

Con las bases de la metodología abordada en la sección 2.1 se plantea la función del problema de optimización, la cual consiste en encontrar los parámetros *t(x)*, *l(x)* y *θ(x)* de la geometría reticular, que minimicen el desplazamiento efectivo, y a su vez con este encontrar una densidad relativa que nos permita tener el mayor σ_{ij}, de esta manera la densidad relativa dependerá de valores donde: *t(x)* es un espesor, *l(x)* una longitud y *θ(x)* un ángulo interno de la geometría, parámetros que se muestran en la Figura 2a. En la Figura 2b se muestra una vista preliminar de implementación de la estructura reticular real en el software para impresión 3D CURA.

a) b)

Figura 2. a) Parámetros de la geometría reticular Octeto, b) Vista preliminar del Lattice implementada en pieza.

Para la homogeneización se usó el software nTopology, uno de los primeros pasos es generar una celda unitaria cúbica, en este caso de 10 mm de arista, con el que se delimita el espacio de la estructura reticular básica, también se le realiza un mallado estructural de 0.02 mm y se agregan las propiedades mecánicas del material ABS, como el módulo de Young = 2.4×10^9 Pa, Coeficiente de Poisson = 0.37 y la densidad 1050 kg/m^3, los cual son necesario para el análisis de elemento finito. Posterior a esto, se realizará diferentes iteraciones de la simulación para las que se tendrá una variación de espesor *t*. Una descripción del módulo de Homogeneización de nTopology es: “Analizar un modelo FE de una celda unitaria periódica para determinar sus propiedades de material elástico homogeneizado en función de las condiciones de carga periódica. Estas propiedades se pueden utilizar posteriormente para simular los diseños complejos, eliminando la necesidad de mallar y simular el diseño real”.

Como se muestran en la Figura 3 se obtuvieron las propiedades mecánicas de la geometría reticular para diferentes espesores *t*, en la Figura 3(b,e) se observan los desplazamientos de la geometría reticular en los diferentes ejes, para el Octeto su desplazamiento máximo en el eje *X* es de 6.85 mm, análogo a ésto, para la geometría Triangular Honeycomb, el desplazamiento es de 6.68 mm, en la Figura 3(a,d) tenemos el módulo de young efectivo, el cual es para la geometría Octeto de 2.94406×10^8 Pa y para el Triangular Honeycomb de 2.94285×10^8 Pa. También se obtuvieron las densidades relativas y las tensiones efectivas σ_{ij} Figuras (c,f), donde se obtuvo el σ_{ij} máximo con la

menor densidad relativa, resultando para el Octeto que el valor de espesor *t* de 1.4 mm, el cual proporciona la mayor resistencia con una densidad relativa de 0.85%. Para el caso del Triangular Honeycomb, análogamente se encontró un valor de *t* de 0.8 mm, mostrados en las Figuras 3(c,f) respectivamente.

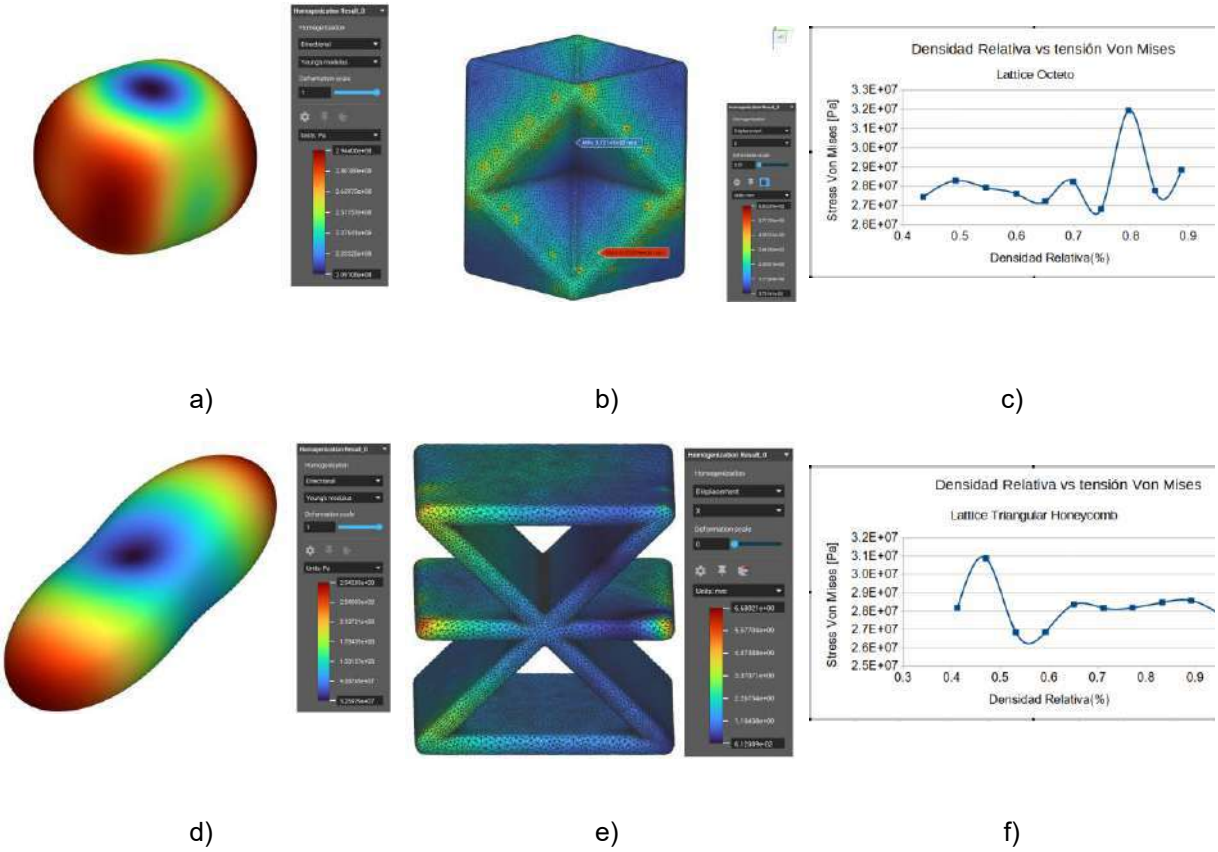


Figura 3. (a,d) Módulo de Young direccional del lattice homogeneizado, (b,c) Desplazamientos del Lattice sobre el eje X, (c,f) Gráfica de Valor máximo de Esfuerzo, Von Mises (Pa) vs Densidad Relativa (%). Octeto (a,b,c), Triangular Honeycomb (d,e,f).

3. Resultados

Para la validación de la optimización topológica se seleccionó una de las piezas que soportan los propulsores, Figura 4d, a la cual se implementaron las dos geometrías reticulares para verificar que el robot resistiera las cargas de trabajo al realizar la tarea de inspección.

El análisis se realizó aplicando las fuerzas y presiones que actúan durante la navegación e inspección bajo el agua a una profundidad de 100 metros: presión = 10 atm y la fuerza = 50 N que ejerce cada propulsor, obteniendo los esfuerzos Von Mises y desplazamientos, entre otros. En la Figura 4a se muestran las condiciones de contorno (cargas y partes fijas), condiciones de frontera de la pieza. (rojo= fijas, amarillo= carga de 50N, verde= presión 10 atm). En la Figura 4(b,c) se muestran las gráficas de Von Mises y las áreas de esfuerzo de las piezas. En la Figura 4(e,f) se observa un corte de sección donde podemos ver la implementación de la estructura reticular usada.

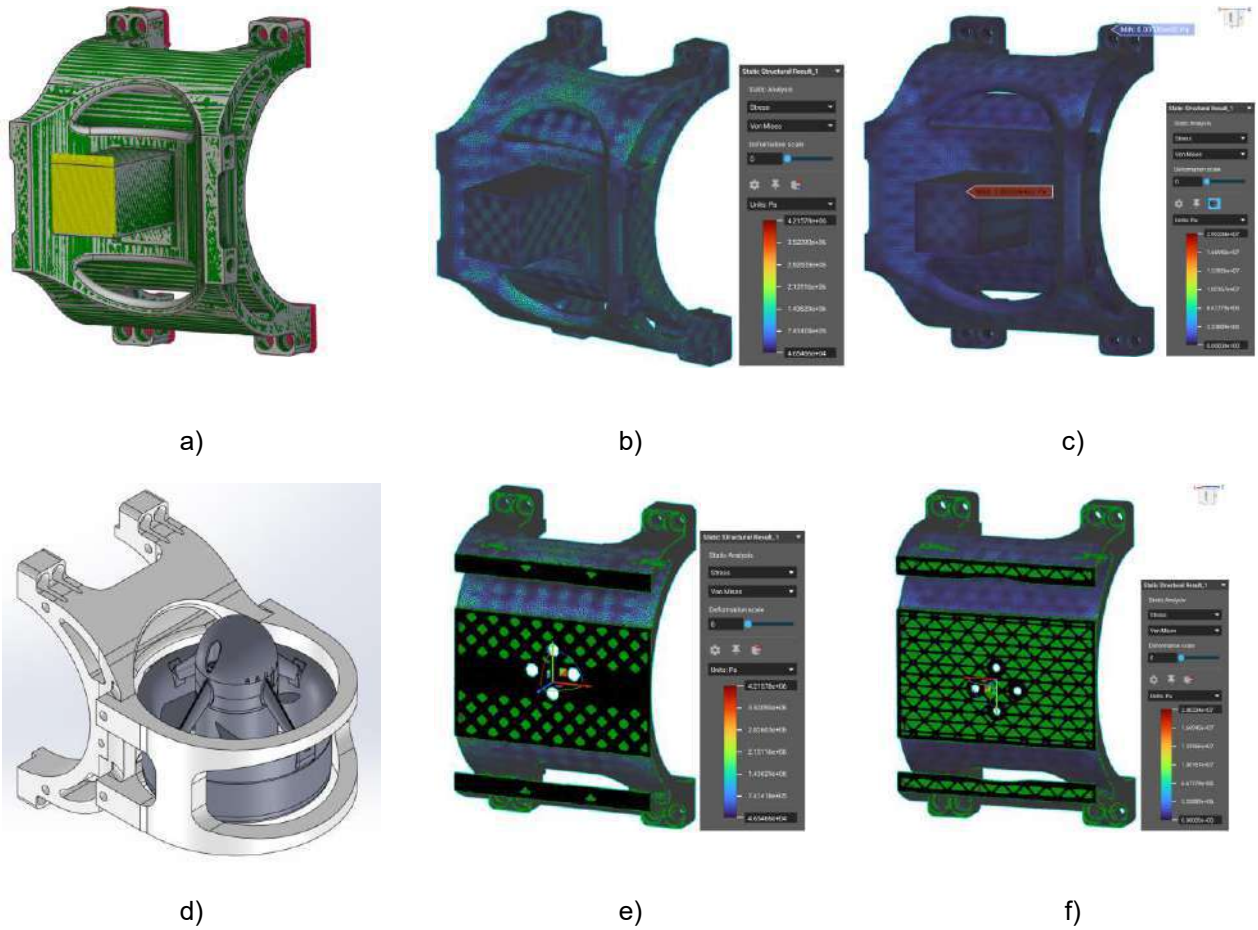


Figura 4. a) Condiciones de contorno de la pieza, (b,c) Esfuerzo de Von Mises, d) Soporta el propulsor, Vista de sección de las geometrías reticulares internas. e) Octeto, f) Triangular Honeycomb.

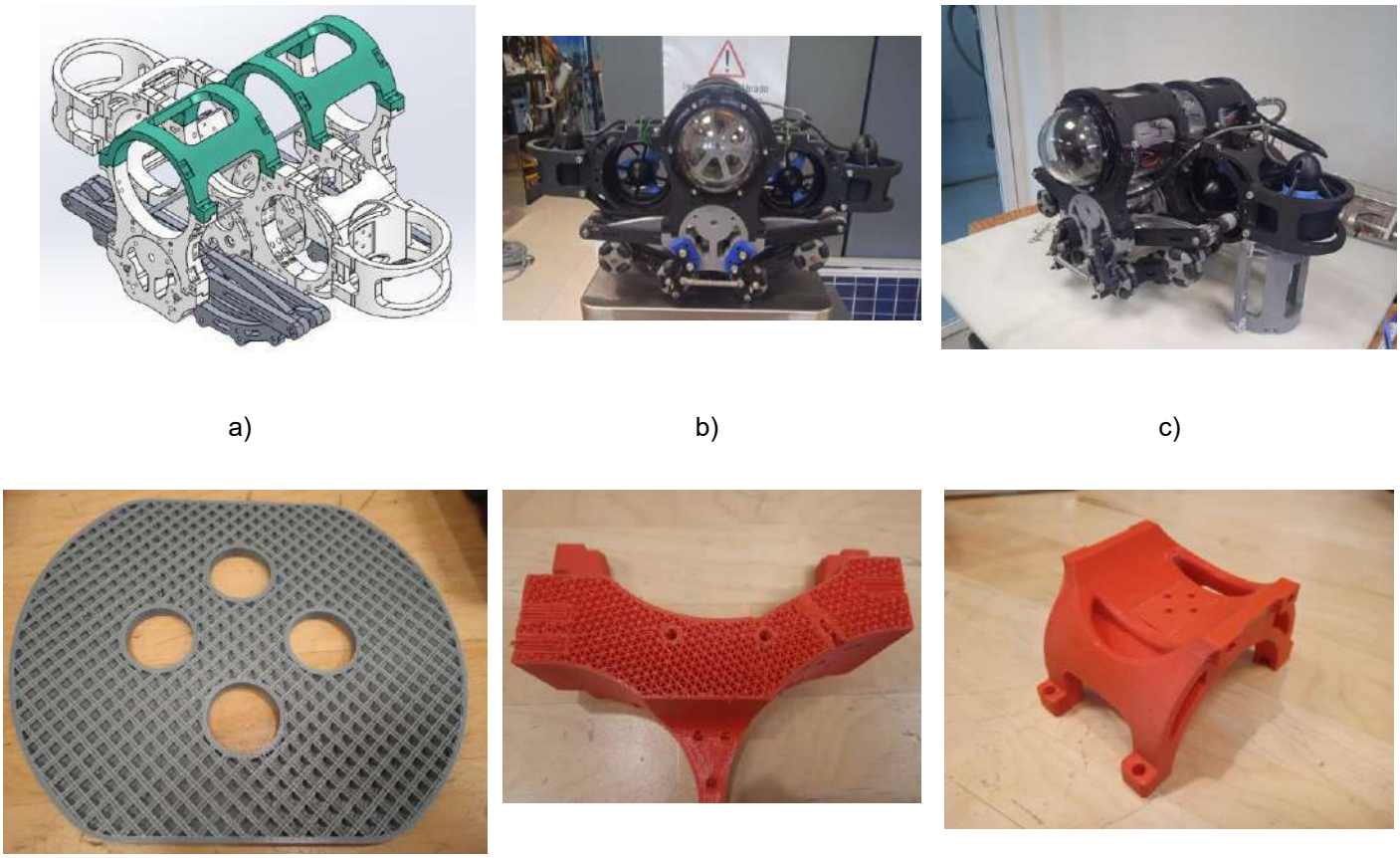
Con los resultados del análisis de la pieza elegida, se obtiene la Tabla 3 en la cual se muestran los valores de esfuerzo de la pieza a diferentes porcentajes de relleno y geometría reticular, donde se observa una disminución de peso del 41% para la geometría reticular Triangular, sin embargo, la que tiene una mejor relación de resistencia y peso es la geometría reticular Octeto al 85% de relleno.

Tabla 3: Valores de esfuerzo máximo obtenidos de los análisis EF de la pieza

Descripción del infill (%)	Von Mises stress (Pa)	Peso de la pieza (g)
Octeto 0.9 mm (50 %)	6.686×10^{6}	138.2
Octeto 1.4 mm (85 %)	4.215×10^{6}	152.98
Triangular 0.8 mm (50 %)	2.003×10^{7}	120.08
Triangular 1.3 mm (85 %)	1.344×10^{7}	143.04
Pieza sólida (100 %)	3.671×10^{6}	205.86

Una vez establecido el parámetro de espesor *t(x)* de la geometría que proporciona la mejor resistencia mecánica al esfuerzo aplicado, se procedió a manufacturar la estructura del robot con el material ABS Color Plus con una temperatura de extrusión de 230°C, temperatura de la plancha de 100°C, velocidad de impresión de 70 mm/s altura de capa de 0.1 mm. La Figura 5a muestra el diseño CAD a imprimir (piezas blancas y verdes), en la Figura 5(b,c) una vista frontal e isométrica del prototipo completo impreso respectivamente. Las Figura 5(d,e) muestran la estructura reticular interior de la pieza en diferentes geometrías, la Figura 5f muestra la pieza soporte de motor manufacturada.

El peso estimado de la estructura del robot con las piezas sólidas es 2.25 kg con el material ABS, después de la implementación de las estructuras reticulares se tuvo una reducción de peso del 25.69%, lo equivalente a 0.578 kg.

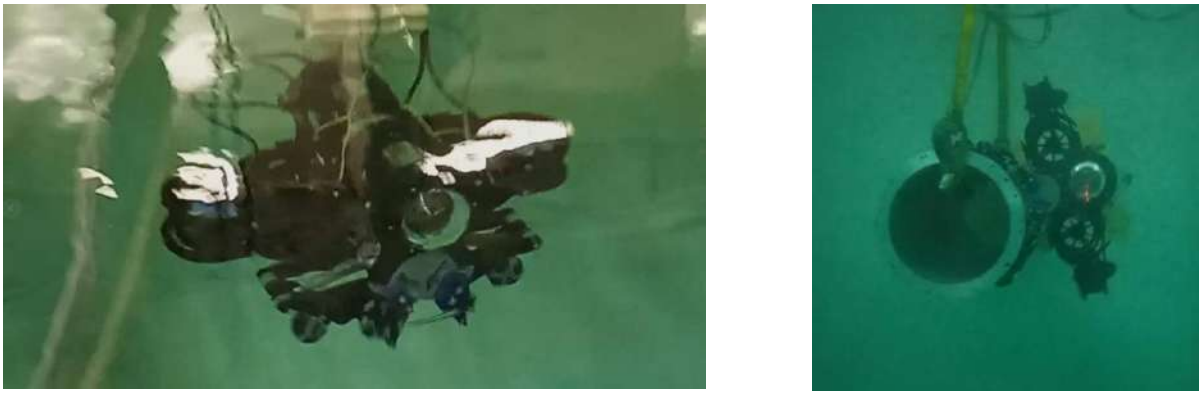


a) b) c)

d) e) f)

Figura 5. a) Estructura en CAD, b) Vista frontal de ensamble del ROUV, c) Vista isométrica ROUV, d,e,f) Piezas de prueba manufacturadas en ABS.

En las pruebas de laboratorio, se utilizó una alberca con dimensiones de 3.5 m largo, 2.5 m ancho, 2.5 m profundidad con agua salada, donde se realizaron pruebas de desplazamiento lineales en forma de rectángulo siguiendo el contorno de la alberca, movimientos de emersión e inmersión, posterior se realizó la prueba de acople a una tubería de aluminio de 10 pulgadas bajo el agua en la cual se realizaron giros ROUV y tubería acoplados, Figura 6b.



a) b)

Figura 6. Pruebas del ROUV en un entorno controlado de trabajo: a) Desplazamiento, b) Rotación sobre tubería

4. Conclusiones

El método de homogeneización empleado para la optimización topológica con estructuras reticulares ha demostrado ser una vía efectiva para la fabricación de un ROUV. Los resultados obtenidos tanto en el análisis numérico como en laboratorio respaldan que los materiales y densidades seleccionadas cumplen con los requerimientos de diseño. Por lo que se puede dar la siguiente conclusión:

a. Viabilidad del uso de la manufactura aditiva: Se concluyó con éxito el diseño y manufactura del robot con la geometría de relleno octeto, obteniéndose del análisis numérico una resistencia de 4.2 MPa para una carga de 50 N y presión de 10 atm. Comparado con los valores de especificación para el material ABS, donde la resistencia a la tracción es de 40 MPa, se tiene un factor de seguridad de 9.
b. Reducción del peso en un 25.69% en la manufactura de la estructura del ROUV por medio de estructuras reticulares.
c. Se encuentra que la manufactura aditiva tiene varias ventajas sobre la manufactura sustractiva, tales como: un entorno de usuario amigable, no se necesitan herramientas especializadas para la manufactura, uso eficiente de un material para la creación de cualquier pieza de diferentes dimensiones independientemente de su complejidad.

A pesar de que se tuvieron beneficios en la construcción del ROUV por la manufactura aditiva, también se han identificado desafíos técnicos en su implementación, algunos de ellos son:

a. Problemas con la repetibilidad de piezas, especialmente las condiciones ambientales de temperatura, para variaciones de +/- 5°C a la ambiente, influye en el rendimiento de la impresora lo que origina problemas de calidad de las piezas.
b. Problemas de acabado superficial, ya que comúnmente se necesita de un post-procesado, para quitar rebabas y soportes, y así obtener el acabado deseado.
c. Limitación del tamaño del área de trabajo, debido a un espacio de trabajo reducido, para piezas que sobrepasan las dimensiones, se debe realizar divisiones o segmentaciones para la manufactura.

Referencias

[1] Ypsilantis, K., Kazakis, G., & Lagaros, N. D. (2021). An efficient 3D homogenization-based topology optimization methodology. Computational Mechanics, 67(2), 481-496. https://doi.org/10.1007/s00466-020-01943-w

[2] Cheng, L., Liu, J., Liang, X., & To, A. C. (2018). Coupling lattice structure topology optimization with design-dependent feature evolution for additive manufactured heat conduction design. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 332, 408-439. https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.12.024

[3] Anant Prakash Agrawal, Virendra Kumar, Jitendra Kumar, Prabhu Paramasivam, Seshathiri Dhanasekaran , Lalta Prasad , An investigation of combined effect of infill pattern, density, and layer thickness on mechanical properties of 3D printed ABS by fused filament fabrication, Heliyon, 23 May 2023, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16531.

[4] Hassanieh, S. A., Alhantoobi, A., Khan, K. S., & Khan, M. S. Mechanical Properties and Energy Absorption Characteristics of Additively Manufactured Lightweight Novel Re-Entrant Plate-Based Lattice Structures. Polymers, 13(22), 3882., 2021, https://doi.org/10.3390/polym13223882.

[5] Shi, X., Liao, W., Liu, T., Zhang, C., Li, D., Jiang, W., Wang, C., & Ren, F. Design optimization of multimorphology surfacebased lattice structures with density gradients. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 117(7-8), 2013-2028, 2021. https://doi.org/10.1007/s00170-021-07175-3.

[6] Cheng, L., Liu, J., Liang, X., & To, A. C. (2018). Coupling lattice structure topology optimization with design-dependent feature evolution for additive manufactured heat conduction design. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 332, 408-439. https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.12.024.

[7] Nociones básicas de optimización topológica: Cómo usar modelos algorítmicos para crear un diseño ligero. (s. f.). Formlabs. https://formlabs.com/es/blog/optimizacion-topologica/

[8] Shashank Pandey, Shrikant Vidya, P. Suresh, Comparative finite element analysis of ISO standard bolt using ABS and PLA material, Materials Today: Proceedings, 13 September 2022, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.063.

[9] Chetan Y. Bachhav a, Puskaraj D. Sonawwanay, Numerical comparison of additive manufacturing of ABS material based on infill design subjected to tensile load, Materials Today: Proceedings, 6 May 2022, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.806.

[10] Makara Lay, Nuur Laila Najwa Thajudin, Zuratul Ain Abdul Hamid, Arjulizan Rusli, Muhammad Khalil Abdullah, Raa Khimi Shuib, Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding, Composites Part B, 12 August 2019 , https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107341.

[11] Zhu, J., Zhang, W., & Xia, L. (2015). Topology optimization in aircraft and aerospace structures design. Archives of Computational Methods in Engineering, 23(4), 595-622. https://doi.org/10.1007/s11831-015-9151-2

[12] Zhu, J., Zhou, H., Wang, C., Lu, Z., Yuan, S., & Zhang, W. (2021). A review of Topology Optimization for Additive Manufacturing: Status and Challenges. Chinese Journal of Aeronautics, 34(1), 91-110. https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020

[13] Jihad Sahili, Ali El-Hadi Hamoud, Ahmad Jammoul, ROV Design Optimization: Effect on Stability and Drag forcé, Proceedings of the 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (IcRoM 2018), October 23-25, 2018, Tehran, Iran

[14] Lucian Stefanita Grigore, Amado-George Stefan, Octavian Orban, Using PET-G to Design an Underwater Rover Through 3D PrintingTtechnology, Mater. Plast., 57 (3), 2020, 189-201, https://doi.org/10.37358/MP.20.3.5393.

[15] Arron Griffiths, Aleksandr Dikarev, Pete R. Green, Barry Lennox, Xavier Poteau, and Simon Watson, AVEXIS—Aqua Vehicle Explorer for In-Situ Sensing, IEEE Robotics and Automation Letters, VOL. 1, NO. 1, JANUARY 2016, https://doi.org/10.1109/LRA.2016.2519947.

[16] Hassani, B., & Hinton, E. (1998). A Review of Homogenization and Topology Optimization i—Homogenization Theory for media with Periodic Structure. Computers & Structures, 69(6), 707-717. https://doi.org/10.1016/s0045-7949(98)00131-x

[17] Andreassen, E., & Andreasen, C. S. (2014). How to determine composite material properties using numerical homogenization. Computational Materials Science, 83, 488-495. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.09.006

[18] Héctor A. Moreno, Roque Saltarén, Lisandro Puglisi, Isela Carrera, Pedro Cardenas, César Álvarez, Robótica Submarina: Conceptos, Elementos, Modelado y Control, Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 11 (2014) 3– 19, http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2013.11.001.

[19] NRF-014-PEMEX-2013, Inspección, Evaluación y Mantenimiento de Ductos Submarinos, Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios en la sesión 92, 04 de abril de 2013.
[20] Antonio Ramirez-Martinez , Noé Amir Rodríguez-Olivares , Sergio Torres-Torres, Guillermo Ronquillo-Lomelí and Jorge Alberto Soto-Cajiga, Design and Validation of an Articulated Sensor Carrier to Improve the Automatic Pipeline Inspection, Sensors 2019, 19, 1394; https://doi:10.3390/s19061394.
[21] Moore, S. W., Bohm, H., & Jensen, V. (2010). Underwater robotics: Science, Design & Fabrication.
[22] R. Salazar, A. Campos, V. Fuentes, A. Abdelkefi, A review on the modeling, materials, and actuators of aquatic unmanned Vehicles, Ocean Engineering, 11 December 2018, https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.11.047
[23] ASTM D570-98 - Standard Test Method for Water Absorption of Plastics, American Society for Testing and Materials, August 2018
[24] L Bergonzi,, M Vettori1, L Stefanini, L D'Alcamo, Different infill geometry influence on mechanical properties of FDM produced PLA, The 49th AIAS Conference (AIAS 2020), IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2021, https://doi:10.1088/1757-899X/1038/1/012071.

Agradecimientos

Los participantes de este documento agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por el apoyo económico otorgado durante el desarrollo del proyecto, en especial el becario No. 1154255, Daniel Alejandro Godínez Trinidad, estudiante de Maestría.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 38, pp. 493 – 504
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Detección de los impulsos de marcapasos en señales ECG mediante hardware

Vázquez Ruiz José Ossiel, García Cruz Iván Daniel y Cajiga Soto Jorge Alberto

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial
jose.vazquez@cidesi.edu.mx

Resumen

Este trabajo se centra en la detección por hardware de las pendientes de los impulsos de los marcapasos presentes en las señales de electrocardiografía (ECG). El diseño sigue una metodología de tres etapas propuesta por Texas Instruments para una detección eficiente. La primera etapa deriva la señal con un amplificador operacional, la segunda utiliza un comparador de ventana para detectar los picos característicos y la última incorpora un latch que almacena el estado de detección y activa un LED indicador. El sistema es ajustado y validado para operar en diferentes niveles de amplitud y diferentes tiempos de duración de las señales de los marcapasos presentes en ECG, con amplitudes de 2mV a 500mV y con tiempos de duración de 0.0001s a 0.5s. Los resultados resaltan la viabilidad y flexibilidad del enfoque basado en hardware, en la detección precisa de los impulsos de marcapasos en señales ECG, liberando el consumo de recursos de microcontroladores en el procesamiento y filtrado de señales, enfocando los recursos en tareas más críticas. El enfoque propuesto tiene potencial para mejorar dispositivos médicos que dependen de esta detección para diagnóstico y tratamiento.

Palabras clave: Marcapasos, Detección de marcapasos, Electrocardiograma, Detección de pendientes.

1. Introducción

En el ámbito de la atención médica cardiovascular, la precisión y eficacia son fundamentales. Los marcapasos artificiales desempeñan un papel vital en la regulación y mejora de la función cardíaca, especialmente en casos de ritmos cardíacos irregulares como la bradicardia y la insuficiencia cardíaca. Estos dispositivos emiten impulsos eléctricos que estimulan el músculo cardíaco, garantizando un ritmo cardíaco adecuado. Sin embargo, es esencial detectar de manera precisa los impulsos generados por los marcapasos en las señales de electrocardiograma (ECG) para evaluar adecuadamente la eficacia del marcapasos y la salud del paciente [1].

La identificación de los impulsos de marcapasos en las señales de ECG presenta un desafío considerable, debido a la interferencia de ruido, artefactos y fluctuaciones en la señal. Esta situación puede dar lugar a inexactitudes en la detección, con posibles repercusiones graves, como la aplicación errónea de tratamientos o la desfibrilación involuntaria de un marcapasos. Estos impulsos proporcionan información valiosa sobre la salud cardíaca del paciente y la eficacia del tratamiento con marcapasos, que asegura su identificación precisa sea un paso esencial para mejorar la atención médica y facilitar un tratamiento más efectivo [2].

Se emplean dos enfoques principales para detectar los impulsos generados por marcapasos: los métodos basados en software y los métodos basados en hardware. Los métodos de software ofrecen flexibilidad pero pueden ser sensibles al ruido [3], mientras que los métodos de hardware son más eficientes en velocidad y energía, pero pueden tener limitaciones en la flexibilidad y la implementación de algoritmos complejos [2].

La detección precisa de los pulsos del marcapasos en las señales de ECG es esencial debido a las limitaciones comunes de los dispositivos ECG estándar. Estas limitaciones, como la capacidad limitada para captar frecuencias y la velocidad de muestreo más lenta, a menudo dificultan la detección confiable de los pulsos del marcapasos. Estos pulsos son muy cortos (0.0001 a 0.5 s) y, a veces, tienen amplitudes muy pequeñas (2 a 500 mV) en comparación con los intervalos de muestreo normales. Para abordar este desafío, se reconoce la importancia de utilizar una instrumentación más adecuada. Esto permite una detección más precisa de los pulsos del marcapasos y aumenta la confiabilidad de los resultados [4]

Este trabajo se enfoca en la estrategia para desarrollar un dispositivo electrónico que detecta marcapasos en pacientes, implementado en hardware, lo que ayuda a reducir posibles daños durante la desfibrilación y evita errores en el análisis de electrocardiogramas. Este desarrollo es relevante ya que se integra como un módulo en un proyecto más amplio y complejo, lo que ahorra recursos de procesamiento computacional y garantiza la ejecución confiable de otros procedimientos clínicos críticos en la aplicación principal.

2. Metodología

Se implementó una metodología basada en el diseño de hardware, en la cual se describe el circuito electrónico, desarrollado, validado y respaldado por expertos de Texas Instruments (TI) [5]. Asimismo, esta proporciona una base teórica, directrices para la selección de componentes, simulaciones, diagramas esquemáticos y propuestas de diseños de una tarjeta electrónica (PCB).

A continuación, se describe una lista de procedimientos en la elaboración e integración del modulo

- Adquisición de señales ECG.
- Diseño de tres etapas para el procesamiento de la señal ECG.
  - Derivador.
  - Comparador de Ventana.
  - Memoria de estado biestable.
- Adquisición de datos de señales ECG de pacientes con marcapasos
- Simulación y validación del circuito.
- Diseño de tarjeta electrónica.
- Validación con pruebas de señales.

2.1. Adquisición de señales ECG.

Al trabajar el dispositivo de detección de marcapasos es muy importante tener un sistema de adquisición de señales cardiacas, para esto se utilizó un equipo de evaluación de Texas Instruments “ADS1298RECGFE-PDK”. En la generación de señales electrocardiográficas se empleó un simulador comercial “Fluke Prosim 4” para uso de señales de referencia evaluando la fiabilidad de los módulos.

2.2. Conceptualización del circuito electrónico.

En las primeras etapas del desarrollo de un dispositivo, es crucial examinar detenidamente los conceptos iniciales que guiarán la creación y ejecución del modelo. Este proceso resulta fundamental para enfocar las ideas, redefinir metas y superar los posibles obstáculos que puedan surgir en la implementación del proyecto. Además, tiene el potencial de generar un impacto significativo en la reducción de los costos relacionados con la fabricación del dispositivo, al permitir la minimización del uso de material durante las fases de prototipado.

La lógica utilizada en la detección de señales de marcapasos se fundamenta en reconocer los impulsos generados por estos dispositivos con el fin de sincronizar los latidos cardíacos. Esto se debe a que la señal que emiten se caracteriza por ser un impulso de alta intensidad y breve duración, lo que

posibilita la distinción entre un impulso cardíaco natural y uno artificial. Basándose en este concepto de los impulsos de marcapasos se aborda la lógica del circuito a trabajar [6].

2.2.1. Derivador

En el estudio de electrocardiogramas de pacientes con marcapasos, es posible identificar varios picos relacionados con la actividad eléctrica del corazón, incluyendo los del complejo "Q-R-S" y los generados por el propio dispositivo. Para distinguir estas ondas, aplicamos la técnica de derivación de la señal del ECG. Esto realza las pendientes de los impulsos del marcapasos, haciéndolos más visibles. Esta modificación subraya una variación significativa en la tasa de cambio en la señal con respecto al tiempo, lo cual es esencial para detectar picos o puntos de inflexión [7]. En la figura 1 se muestra una configuración del circuito derivador.

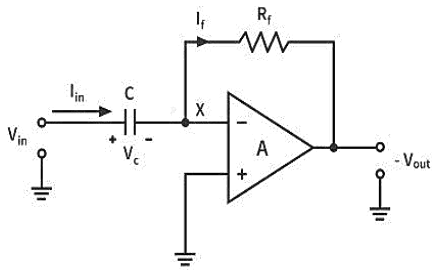


Figura 1. Circuito derivador [8].

El voltaje de salida se obtiene de la función de transferencia del circuito de la fórmula 1, donde la salida es igual a la tasa de cambio por la constante de tiempo

$$Vo = -(R \times C) \times \left(\frac{d}{dt} Vi\right) \tag{1}$$

2.2.2. Comparador de ventana

En la detección de pendientes, el comparador de ventana desempeña un rol clave al establecer un umbral para detectar eventos. Esto implica configurar los niveles de voltaje alto y bajo de manera que permitan detectar las variaciones en la señal derivada causadas por los pulsos del marcapasos. Esto se traduce en la generación de un pulso lógico que indique si la señal está dentro o fuera del rango deseado. Ajustar con precisión estos umbrales es crucial para evitar la detección incorrecta de los pulsos relacionados con la actividad cardíaca.

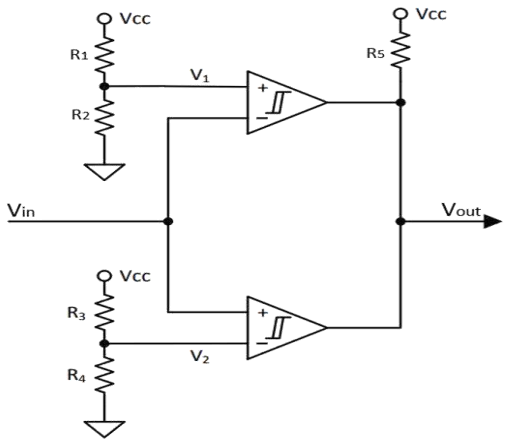


Figura 2. Circuito comparador de ventana [5].

Para determinar los valores de referencia V1 y V2 que configurarán el umbral, se utilizan divisores de voltaje, como se ilustra en la figura 2. En el caso de los comparadores de ventana, Texas Instruments aconseja el empleo de comparadores con salidas "open-drain" o "open-collector" con el fin de facilitar la operación lógica OR en la salida [9].

2.2.3. Memoria de estado biestable

Para retener el estado de la detección de pendientes en el comparador de ventana, se utiliza un circuito SR-Latch, como se muestra en la figura 3, para establecer una memoria de estado. Esto se vuelve necesario para preservar los eventos detectados por el comparador de ventana cuando un pulso de la señal derivada cruza el umbral del comparador. Además, permite invertir el pulso lógico para activar un indicador visual, como un diodo emisor de luz, señal que además puede ser utilizada por otro dispositivo para indicar la presencia del pulso de un marcapasos.

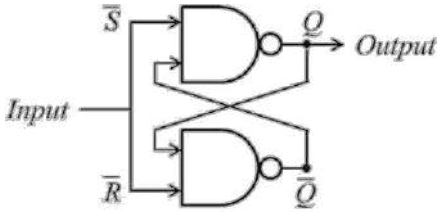


Figura 3. Circuito SR-latch con memorias NAND [10].

Se emplea un SR-Latch, haciendo uso de su capacidad de biestable, la cual se determina a través de dos estados de entrada: "Set" (establecer) y "Reset" (reiniciar). El estado de la salida del latch cambia a un nivel lógico alto cuando la entrada S recibe un nivel lógico bajo, y se restablece al estado inicial de nivel lógico bajo cuando la entrada R cambia a nivel lógico bajo [11].

2.3. Manejo de base de datos de señales ECG.

En la metodología, es fundamental obtener estudios de señales de pacientes con marcapasos para validar el circuito. Utilizamos señales de un simulador comercial ECG Prosim 4. Para fortalecer estas pruebas, también se utilizaron señales de pacientes reales, obtenidas de las bases de datos de PhysioNet, un sitio web establecido para compartir señales biomédicas y software de código abierto. Este recurso cuenta con el respaldo de prestigiosas instituciones que revisan la información cuidadosamente. PhysioNet es gestionado por miembros del Laboratorio de Fisiología Computacional del MIT, y otro laboratorio clave asociado a esta plataforma es el "Instituto Margret y H.A. Rey para la Dinámica No Lineal" en el Beth Israel Deaconess Medical Center. [12].”

2.4. Simulación y validación de circuito digital.

Esta etapa es esencial para probar y validar el diseño del circuito antes de la fabricación, otro aspecto importante es que esta etapa permite optimizar recursos como tiempo y dinero. Algunos simuladores permiten realizar simulaciones más o menos complejas, dependiendo de esto, pueden tener de pago o de libre acceso. Para realizar pruebas de concepto se utilizó un simulador de libre acceso basado en SPICE, donde algunos fabricantes proporcionan los modelos para la simulación de sus productos e incluso programas de simulación, como Texas Instruments que licencia el programa TINA simulador SPICE [13].

2.5. Diseño de tarjeta electrónica.

El diseño de la tarjeta electrónica es una etapa importante en el desarrollo de la metodología, siendo el momento en donde se materializa la teoría y los circuitos conceptualizados previamente. Mediante alguna aplicación de diseño de tarjetas electrónicas se procede como primer paso a seleccionar los componentes y crear el diagrama electrónico que contenga todos los módulos,

posteriormente convertir el esquemático a un archivo de diseño donde se realiza la tarjeta electrónica, localizando los componente reales de los principales fabricantes se colocan alrededor de una zona delimitada que será el área interna de la placa y se procede a enrutar las pistas que unen a los componentes, todo esto es importante realizarlo debido a que si se modifica el esquemático se actualizará en el archivo de diseño y viceversa [14]. Es necesario realizar, de ser posible, todos los procesos en un mismo programa, existen diversos en el mercado como Altium Designer siendo un programa con licencia de paga, pero amigable en todo este proceso de diseño de tarjetas electrónicas.

2.6. Validación del módulo de detección de marcapasos.

La validación de la tarjeta de detección de marcapasos es un proceso donde se ratifica el correcto funcionamiento de todos los módulos, aunque en las etapas anteriores se menciona de una simulación, estas consideran ambientes ideales, omitiendo algunas variables como el ruido y la temperatura del ambiente, factores que pueden alterar el sistema. No solo se evalúan las señales emitidas por el simulador que se muestra en la figura 4, sino también las señales extraídas de PhysioNet.

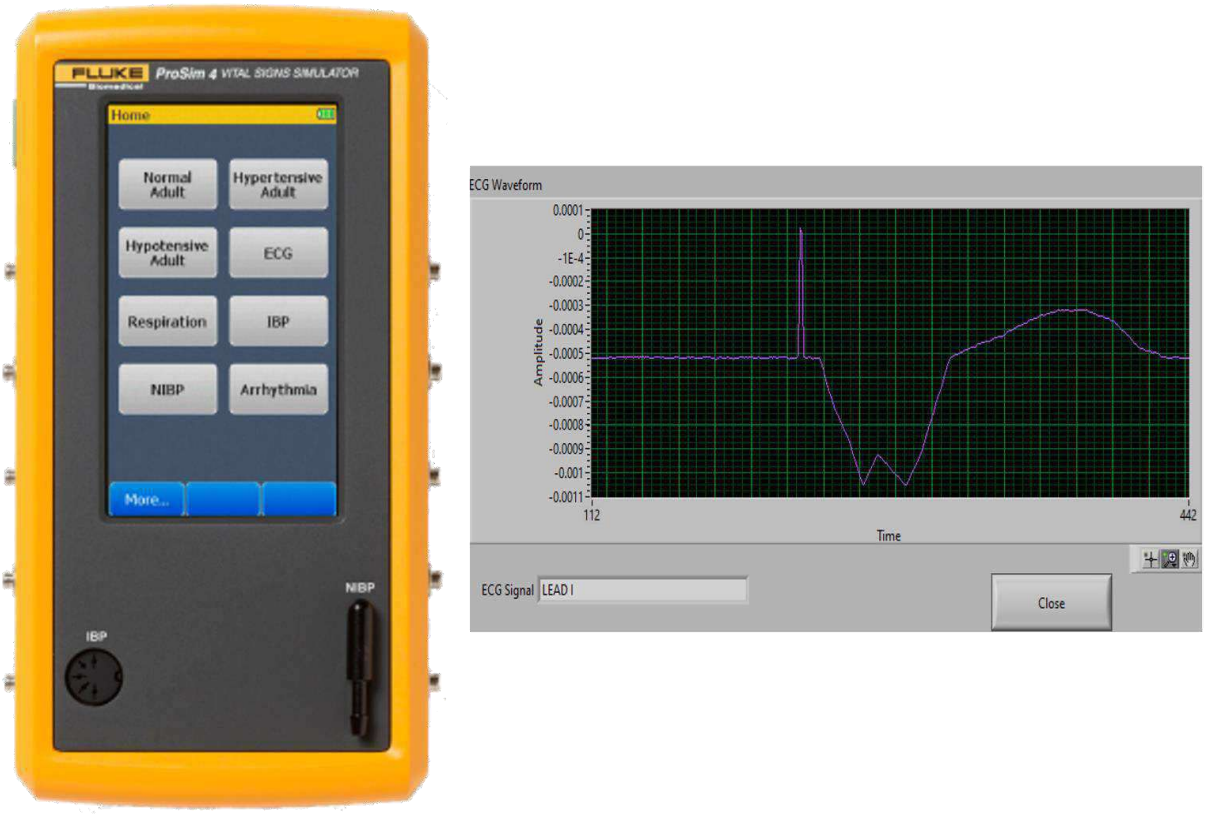


Figura 4. ProSim 4 "simulador de signos vitales para pacientes" [15] y su señal producida.

3. Resultado

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en las tapas de conceptualización, diseño y ejecución del dispositivo detector de pendiente de marcapasos.

En el entendimiento del funcionamiento de la detección de pendientes, se desarrolló un modelo atreves de un script de Matlab. En la figura 5 se muestran tres gráficas que ilustran el procesamiento de las señales siguiendo la lógica del circuito en la detección de marcapasos. La gráfica (A) muestra la señal ECG a procesar, la gráfica (B) representa la señal derivada, y la gráfica (C) muestra la señal

absoluta con los picos marcados con una cruz roja, equivalente al comportamiento del comparador de ventana. En la señal ECG, se puede identificar 12 pulsos correspondientes al ciclo cardíaco con pulsos de marcapasos, mientras que en la señal absoluta se resaltan 12 pendientes que solo representan a los pulsos del marcapasos. Se detecta un resultado similar en el circuito electrónico simulado y físico cuando se introduce la misma señal ECG, como se puede observar en la figura 7 y en la figura 12.

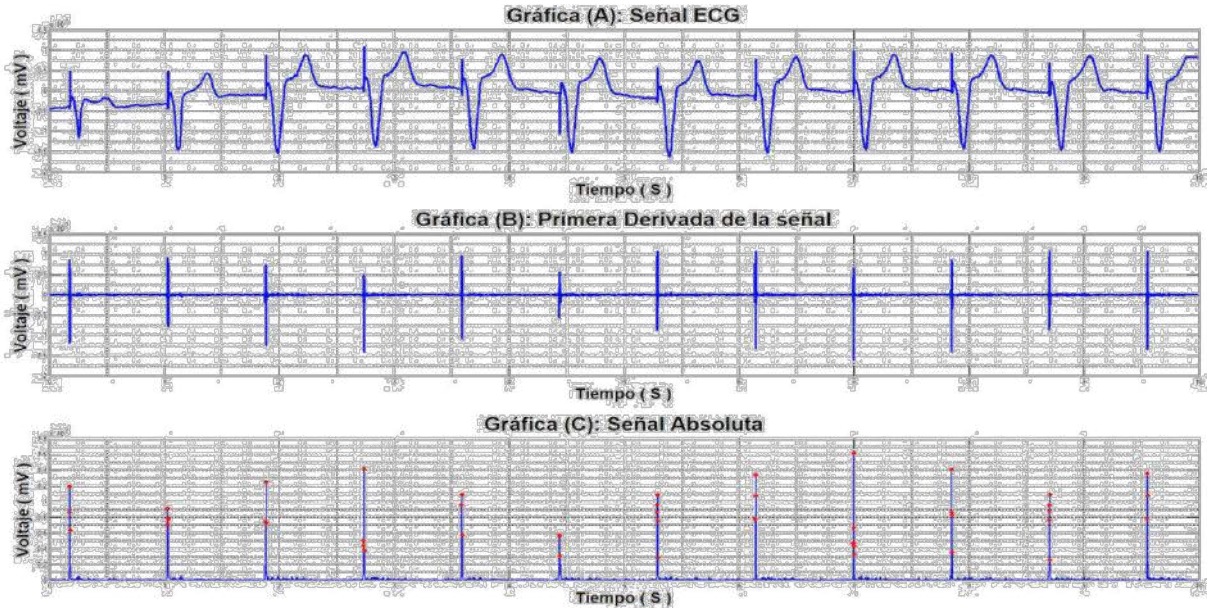


Figura 5. Detección de picos de marcapasos con Matlab.

En la figura 6 se muestra la simulación en la aplicación de TINA con la señal ECG que se procesó anteriormente en Matlab.

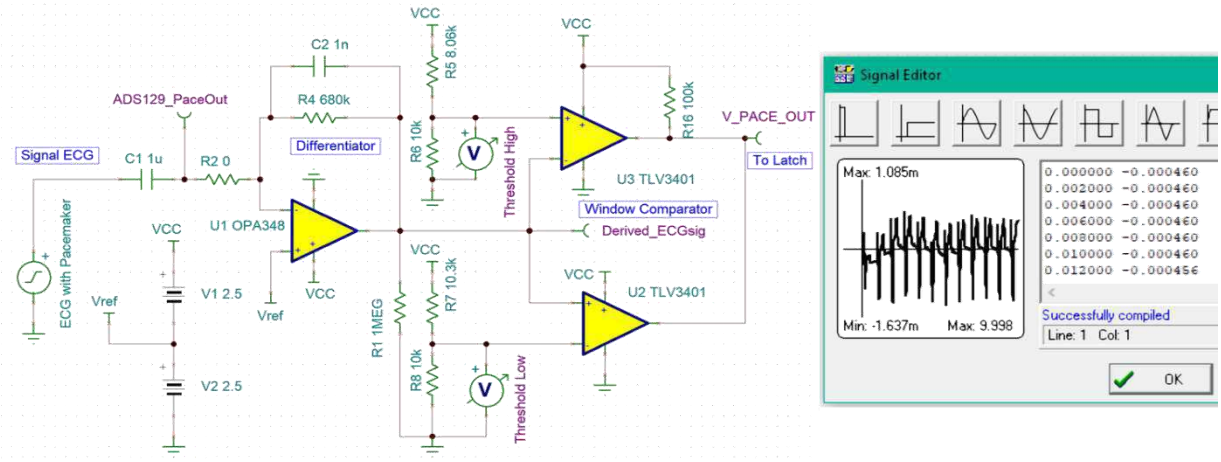


Figura 6. Simulación de circuito con aplicación TINA

El resultado de la simulación en el programa TINA se muestra en la figura 7, siendo la segunda gráfica una señal de una derivación de un electrocardiográfico de un paciente con marcapasos, la primer gráfica es la señal derivada, la cuarta gráfica es la señal de detección de un pulso de marcapasos y la tercer y cuarta gráficas corresponden a los limites inferior y superior del umbral del comparador de la ventana, finalmente la quinta grafica representa la salida del circuito SR-Latch.

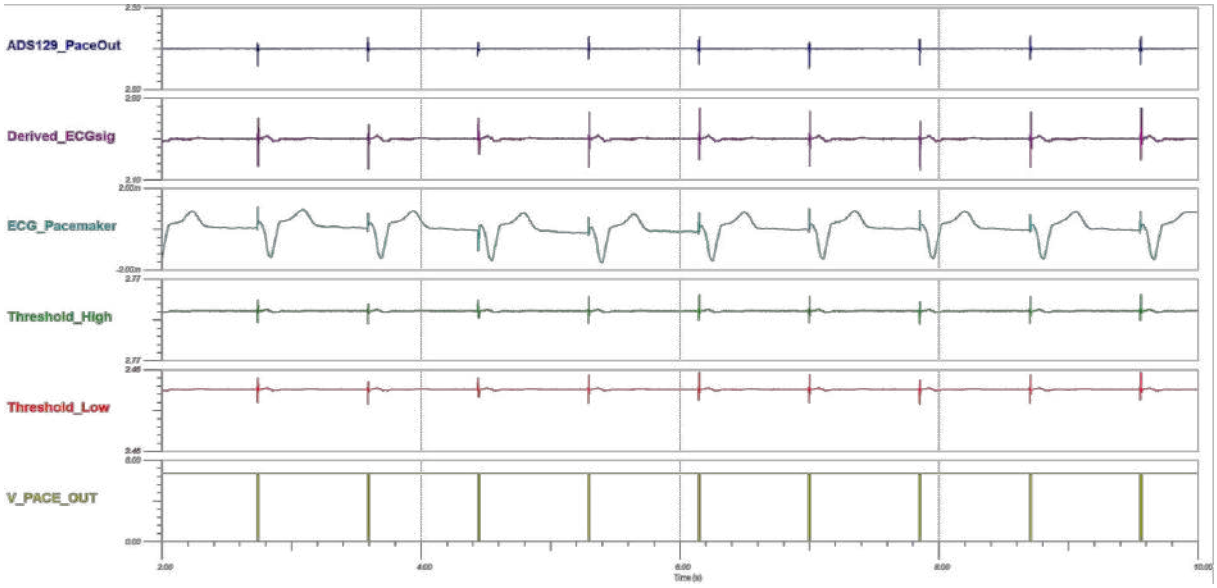


Figura 7. Señales resultantes de la simulación TINA

A continuación, se detalla una parte del proceso de diseño de la tarjeta de circuito impreso. En la figura 8 se exhibe el esquemático requerido para la creación de la placa electrónica. En este esquema se pueden reconocer los componentes, las conexiones a tierra, las fuentes de voltaje VCC (en este caso, de 5 voltios), los conectores y algunos puntos de prueba que resultarán prácticos para supervisar el procesamiento de las señales, así como las referencias de tierra y voltaje.

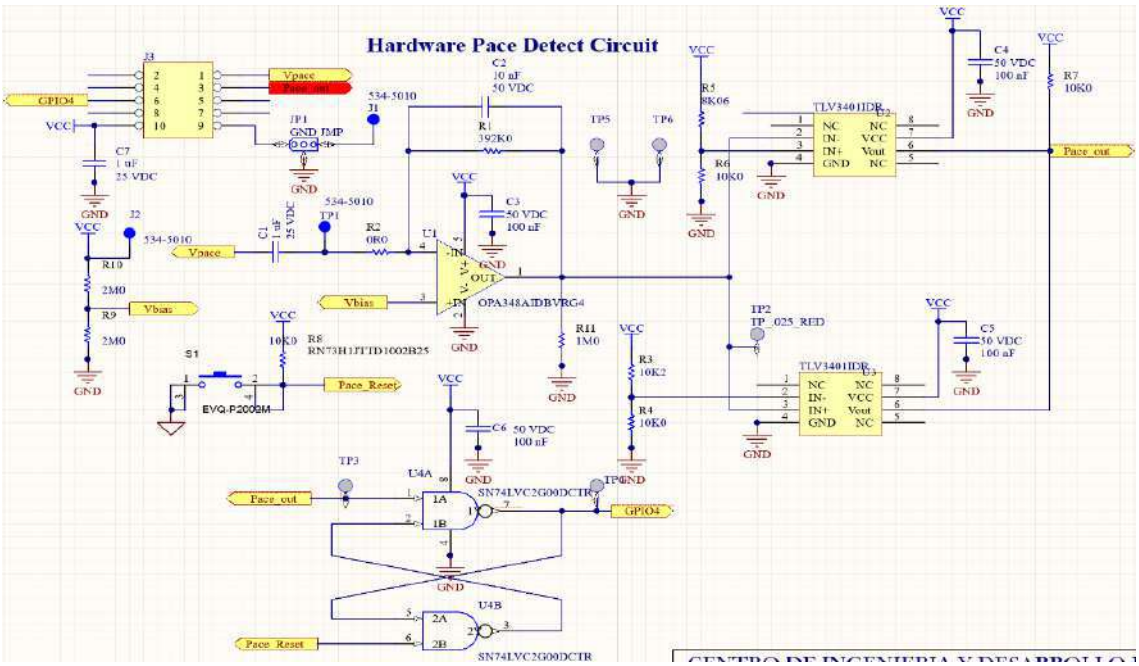


Figura 8. Esquemático del circuito detector

Las imágenes que se presentan en la Figura 9 son el producto de la captura del diseño del circuito en el esquemático. Este diseño está enlazado con el archivo del circuito impreso, lo que permite compartir la lista de conexiones entre componentes. Esto simplifica el proceso de enrutamiento de las

pistas y la planificación de la disposición de los integrados, evitando así la colocación de componentes que puedan dificultar la conexión debido al poco o nulo vinculo entre ellos.

Realizando los procesos adecuados en la captura y diseño del circuito impreso. En la párte izquierda de la figura 9 se muestra una foto del prototipo que se realizo, este se elaborado en una placa fenolica comercial maquinada en un router de control numerico y cubierta por una pelicula anti soldadura de curado por luz ultra violeta.

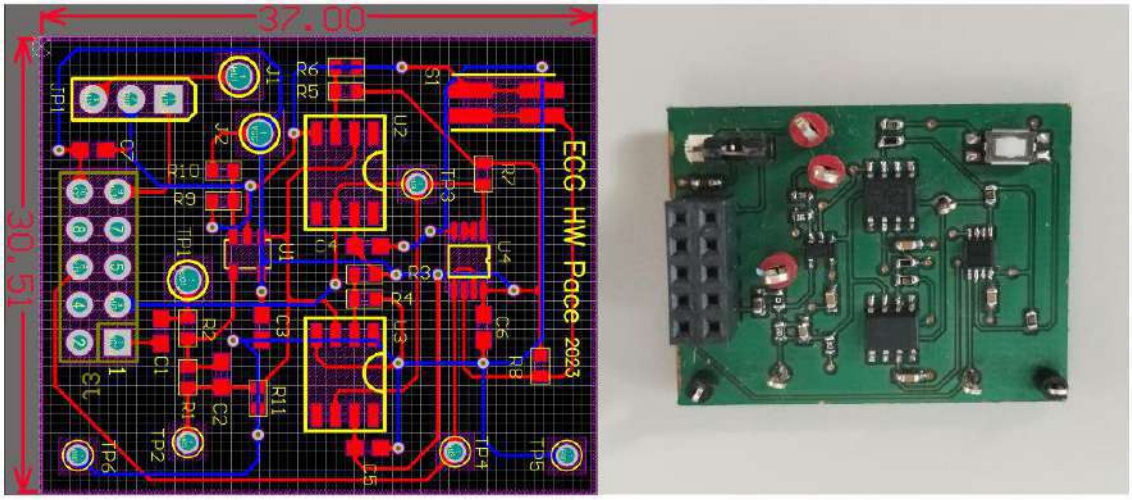


Figura 9. Diseño y prototipo de tarjeta de detección de marcapasos

En la figura 10 se visualiza la señal que se inyecta a la entrada del circuito derivador, consiguiendo observar una pequeña señal de aproximadamente de 3.125 mV pico a pico y con risos típicos de ruido del ambiente.

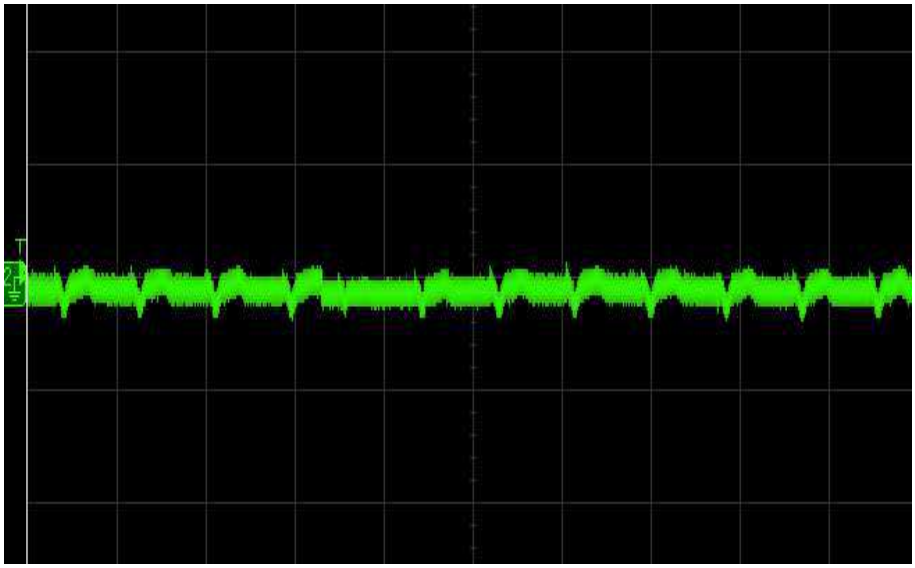


Figura 10. Señal ECG de paciente de prueba con marcapasos

En la figura 11 se presenta la extracción de un ciclo cardiaco de la señal de la figura 10. En la imagen de la izquierda se muestra la señal tal y como entra al detector de marcapasos. La señal de la derecha se detalló para la inspección correcta de la forma de la onda cardiaca, revisando que la forma

de la señal de prueba sea igual a la señal que se validó en Matlab y en el programa de simulación de circuitos TINA.

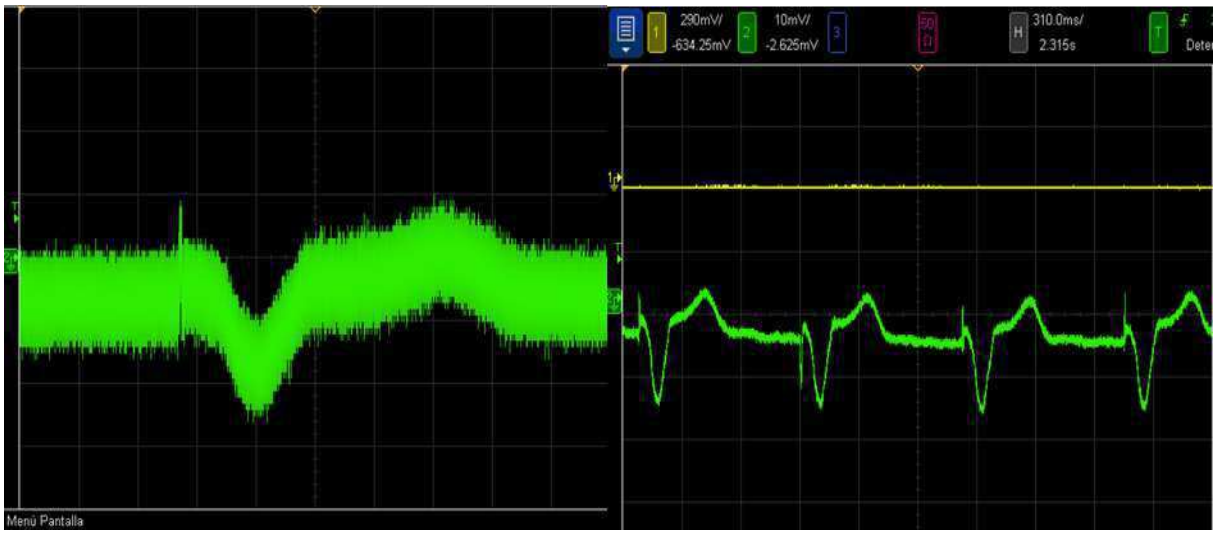


Figura 11. Ciclo cardiaco de la señal ECG

Terminando con el análisis de la derivación del estudio de electrocardiograma de un paciente con marcapasos que se empleó como señal de control en las diversas pruebas, se conectó las puntas del osciloscopio a los puntos de pruebas del prototipo permitiendo observar los procesos que se aplican en el tratamiento de las señales para la detección de los pulsos de marcapasos.

En la figura 12 se muestra tres señales donde la de mayor amplitud es la detección de los pulsos en el comparador de ventana, los otros dos de menor amplitud son las de entrada y salida del derivador.

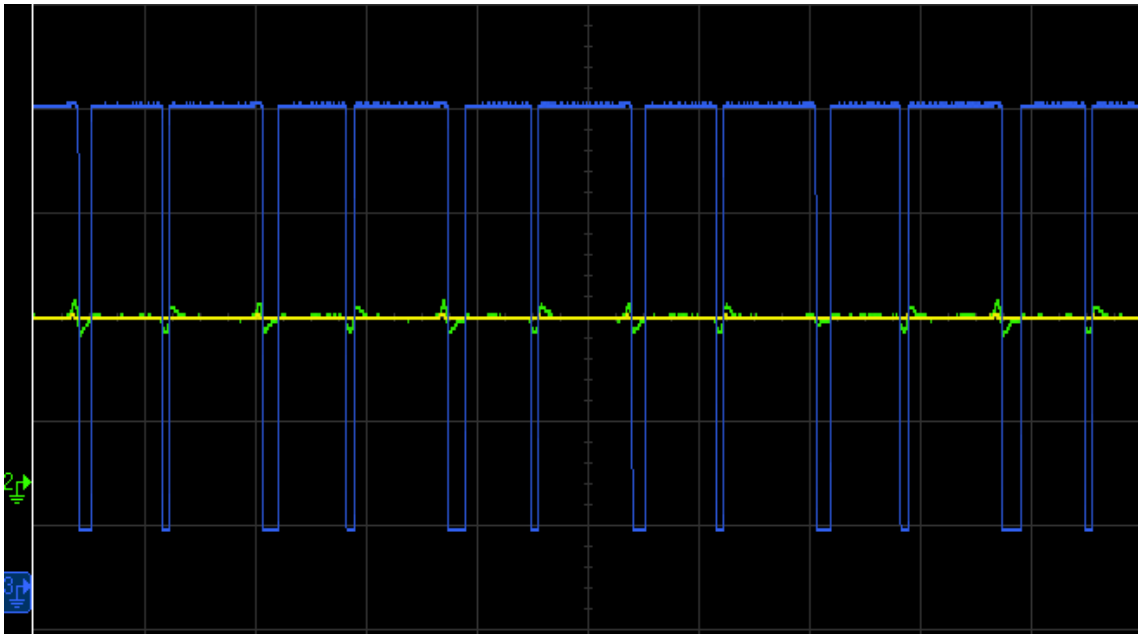


Figura 12. Señales adquiridas de las tres etapas del circuito detector

Figura 13. Señal de ciclo cardiaco para pruebas simuladas

Como prueba extra de validación se aprovechó la funcionalidad del osciloscopio como generador de señales cardiacas y de impulsos. El osciloscopio cuenta dos salidas de generador de señales, una se retroalimenta al osciloscopio mediante un cable coaxial para visualizar el modelo del impulso de marcapasos en el canal 1 y sumarlo con el modelo de la señal cardiaca para sacar la señal resultante en el generador de forma de onda 2, como se muestra a la derecha de la figura 13, a si también se generó otra señal de una derivación del estudio ECG de un paciente con marcapasos, realizando todas las conexiones en los puntos de pruebas de la tarjeta electrónica, repitiendo casi la misma imagen de la figura 12.

Las propiedades de los pulsos que se pueden detectar se muestran en la tabla 1:

Tabla 1. Características de los pulsos de marcapasos detectados.

Características	Mínimo	Máximo	Unidades	Factor
Duración	0.0001s	0.5s	Segundos	10^0
Amplitud	0.002V	0.5V	Voltios	10^0

4. Conclusiones

En este trabajo se presenta la creación de un prototipo físico funcional, capaz de detectar señales de marcapasos en electrocardiogramas, cumpliendo con varios aspectos de las normativas para la detección de los atributos de los pulsos de marcapasos, como las normas ANSI/AAMI ECC11 y la IEC60601-1-27

El módulo permite detectar los pulsos en paralelo con el estudio del electrocardiograma, lo que facilita la derivación directa de la señal del estudio hacia el prototipo, evitando así un aumento en el tiempo necesario para el procesamiento del ECG. Además, el módulo cuenta con una salida que se puede conectar a un Latch, lo que permite implementar una alarma visual o auditiva para indicar la presencia de estos pulsos.

La salida del latch puede dirigirse a un puerto de interrupción para detener la desfibrilación al paciente, o simplemente se puede omitir el uso del latch y enviar directamente los disparos desde la salida del comparador de ventana para sincronizar los pulsos según las necesidades del desarrollador.

La amplitud y duración del pulso detectado depende de los valores de resistencia y capacitancia del circuito derivador, los cuales se pueden sintonizar para un rango de valores de detección, como se ilustra en la Tabla 1. Sin embargo, es necesario aumentar este rango de detección de acuerdo a la normativa establecida, por lo que se sugiere utilizar otro circuito idéntico trabajando en paralelo, con los valores de resistencia y capacitancia adecuados para complementar el rango de operación de detección de pulsos de marcapasos.

5. Agradecimientos.

Este trabajo fue soportado por el proyecto de CONAHCYT 322623 denominado Laboratorio Nacional de Investigación y Tecnologías Médicas.

Referencias

[1] G. Nallathambi, N. Selvaraj y P. L. Rajbhandary, «An innovative hybrid approach for detection of pacemaker pulses at low sampling frequency,» *42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) in conjunction with the 43rd Annual Conference of the Canadian Medical and Biological Engineering Society,* pp. 5012-5015, 2020.

[2] V. V. Tsibulko, I. T. Iliev y I. I. Jekova, «Methods for Detecting Pacemaker Pulses in ECG Signal: A Review,» *ANNUAL JOURNAL OF ELECTRONICS,* vol. 8, pp. 77-80, 2014.

[3] A. Polpetta y P. Banelli, «Fully digital pacemaker detection in ECG signals using a non-linear filtering approach,» *30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society ,* pp. 5406-5410, 2008.

[4] B. Paolo, G. Gaetano Dario, R. Maria y C. Mario, «A simple, wide bandwidth, biopotential amplifier to record pacemaker pulse waveform,» *Medical Devices: Evidence and Research,* pp. 325-329, 2016.

[5] T. Calabria, *Hardware Pace using Slope Detection,* Texas Instruments, 2013.

[6] J. Kruse y C. Redmond, «Detecting and Distinguishing Cardiac Pacing Artifacts,» *Analog Dialogue,* vol. 46, nº 4, pp. 13-18, 2012.

[7] K. Vijaylaxmi y A. Aayushi, «Design and Simulation of VFA and CFA Based Integrator and Differentiator using NI Multisim and their Comparison,» *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering,* vol. 3, pp. 2278-909, 2014.

[8] J. Bishop, «Op-Amp Differentiator,» SwellFox, 19 Agosto 2022. [En línea]. Available: https://www.circuitbread.com/tutorials/op-amp-differentiator. [Último acceso: 14 Septiembre 2023].

[9] Texas Instruments Incorporated, «TI,» Febrero 2019. [En línea]. Available: https://www.ti.com/lit/an/sboa221a/sboa221a.pdf?ts=1695285789441&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. [Último acceso: 16 Septiembre 2023].

[10] N. Torii, H. Kokubo, D. Yamamoto y K. Itoh, «ASIC implementation of random number generators using SR latches and its evaluation,» *EURASIP Journal on Information Security,* pp. 1-12, 2016.

[11] E. Roch, «Transistores,» Transistores, 26 Marzo 2023. [En línea]. Available: https://transistores.info/que-es-el-circuito-electronico-latch-lat-memori-inglet/. [Último acceso: 19 Septiembre 2023].

[12] PhysioNet, «psychonet.org,» psychonet, [En línea]. Available: https://physionet.org/about/. [Último acceso: 19 septiembre 2023].

[13] Z. Peterson, «¿Qué es una simulación SPICE en el diseño electrónico?,» Altium Limited, 4 Enero 2021. [En línea]. Available: https://resources.altium.com/es/p/what-spice-simulation-electronics-design. [Último acceso: 20 Septiembre 2023].

[14] Z. Peterson, «Altium Designer: el mejor software de diseño de circuitos,» Altium Limited, 4 Junio 2022. [En línea]. Available: https://resources.altium.com/es/p/best-circuit-design-software. [Último acceso: 20 Septiembre 2023].

[15] Fluke Biomedical, «flukebiomedical.com,» Fluke, [En línea]. Available: https://www.flukebiomedical.com/products/biomedical-test-equipment/patient-monitor-simulators/prosim-4-vital-signs-patient-simulator. [Último acceso: 22 Septiembre 2023].

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 39, pp. 505 – 515
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Sensor óptico para detectar fugas de sangre en solución dializante en máquinas de hemodiálisis.

Ruiz Ledesma Carlos Aurelio, Estrada Barojas Cesar Omar
y Soto Cajiga Jorge Alberto

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial CIDESI.
carlos.ruiz@cidesi.edu.mx

Resumen

La insuficiencia renal crónica se ha convertido en un problema de creciente preocupación a nivel mundial. Uno de los tratamientos clave para esta afección es la hemodiálisis, un proceso que implica la purificación de la sangre del paciente para eliminar toxinas y exceso de agua utilizando un filtro, también llamado "riñón artificial". A pesar de su eficacia, estos componentes cuentan con miles de fibras semipermeables que, debido a su fragilidad, presentan un riesgo de rotura y, por ende, de fuga de sangre. Para mitigar este riesgo, las máquinas de hemodiálisis comerciales incorporan sensores capaces de detectar fugas de sangre y activar alarmas que detienen el proceso, garantizando así la seguridad tanto del paciente como de la máquina. No obstante, el acceso a repuestos y a la información sobre el funcionamiento de estos sensores son limitados. Este trabajo se centra en el desarrollo de un sensor diseñado específicamente para detectar fugas de sangre en máquinas de hemodiálisis, con el propósito de mejorar la accesibilidad y facilitar futuros desarrollos en estas máquinas. El sensor utiliza un LED bicolor y un fotodiodo como receptor, seleccionados debido a sus propiedades de absorción de la sangre a diferentes longitudes de onda. El diseño electrónico del sensor se divide en tres partes: una para la emisión, otra para la recepción y una tercera para el procesamiento de datos. La gestión de los LED y el fotodiodo se lleva a cabo mediante el circuito integrado AFE4400 de Texas Instruments, mientras que el microcontrolador TIVA TMC4123 se encarga de la comunicación y el procesamiento de datos. Se estableció un sistema de pruebas que simula una solución sanguínea en un entorno controlado, realizando experimentos con diversas concentraciones de sangre simulada y registrando un amplio conjunto de datos para su posterior análisis. El análisis de datos demostró la capacidad del sensor para detectar cambios en la concentración de sangre simulada.

Palabras clave: Sensor óptico, Hemodiálisis, Fuga de Sangre.

1. Introducción

La insuficiencia renal crónica consiste en la pérdida funcional, completa o parcial, de los riñones. Esta afección es un problema mundial, en 2022 se estimó que más de 800 millones de personas en todo el planeta la padecían [1]. México es uno de los países más afectados, en 2017 ocupó el sexto lugar en mortalidad debida a esta enfermedad [2]. Se estima que la población de pacientes se expande de un 5% al 10% por año. Es por esta razón la importancia de mejorar los tratamientos ya existentes y facilitar su acceso a más población.

Uno de los tratamientos más utilizados en países desarrollados es la hemodiálisis. Su objetivo es ser un reemplazo de la función renal y se aplica en personas que han sido diagnosticadas.

Su proceso consiste en purificar la sangre del paciente eliminando toxinas y exceso de agua de su cuerpo a través de una máquina que bombea la sangre desde un acceso vascular, (previamente

realizado mediante una cirugía por un médico), capaz de soportar las presiones y flujos requeridos, la hace pasar por un filtro o "riñón artificial" donde se limpia y finalmente la devuelve al organismo.
El componente principal de la máquina es el filtro, por dentro está compuesto de miles de membranas fibrosas semipermeables por las que circula la sangre, el espacio fuera de las fibras se llena con solución de dializado, la cual está compuesta por agua ultra purificada y por dos concentrados distintos, uno contiene bicarbonato de sodio (y en algunos casos cloruro de sodio) y el otro se trata de un ácido, por lo general ácido acético, ácido cítrico o acetato de sodio. Una de las funciones de la máquina es controlar y obtener la solución a la concentración correcta para garantizar su compatibilidad con el plasma sanguíneo.

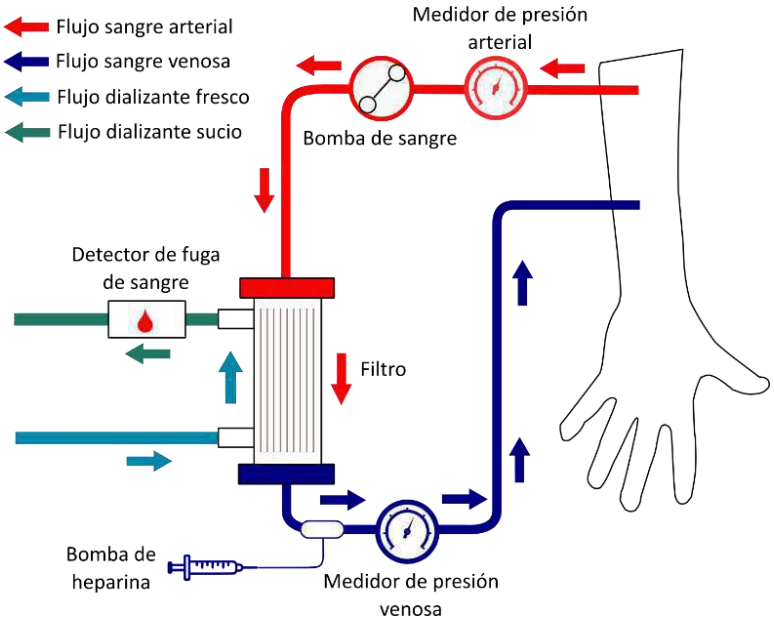


Figura 1. Diagrama general del proceso en un tratamiento de hemodiálisis.

Como lo muestra la figura 1, la sangre y la solución de dializado se hacen fluir en sentidos contrarios, ahí dentro es donde ocurren tres principios físicos que logran la purificación de la sangre y la remoción del exceso de agua. El primero es la difusión, el cual dicta que los solutos de una solución con mayor concentración que otra, separadas ambas por una membrana semipermeable, trataran de moverse del compartimiento de mayor concentración (sangre) al de menor (solución de dializado), tratando de compensar el gradiente de concentración. El segundo es la ultrafiltración, se produce debido a que el flujo de la solución de dializado es mucho mayor al flujo de sangre, lo que produce a su vez una diferencia de presiones y un movimiento de líquido (agua) de la sangre a la solución. El tercero es la convección, se trata de un efecto secundario de la ultrafiltración, donde los solutos más grandes pasan a través de la membrana arrastrados por el paso del agua.

El circuito sanguíneo extracorpóreo es independiente y está separado del circuito dializante, donde su único punto de encuentro es el filtro y donde, en ningún momento, existe un contacto directo entre uno y otro. Sin embargo, debido a que las fibras donde circula la sangre son de unas centenas de micrómetros, existe la posibilidad de su ruptura, ocasionando que sangre pase a la solución de dializado. Por esta razón, dentro de las máquinas de hemodiálisis se coloca un sensor a la salida del circuito de solución de dializado.

La función del sensor es detectar la fuga y, dado el escenario, activar las respectivas alarmas para que el proceso de hemodiálisis se detenga. Incluir el detector de fuga de sangre es importante para prevenir que el paciente pierda sangre y para mantener la inocuidad del sistema.

El uso de este y otros sensores en las máquinas de hemodiálisis es muy importante para mantener el sistema seguro y funcional, sin embargo, la naturaleza de este tipo de tratamientos ocasiona grandes restricciones en su uso, es común que no se encuentren repuestos o que las compañías que fabrican estas máquinas mantengan la información resguardada. Es por esto que en este trabajo se describe el desarrollo de un sensor para la detección de fuga de sangre en máquinas de hemodiálisis, con el fin de que nuevos desarrollos de máquinas puedan usar un diseño igual o similar.

2. Principio de Operación.

La figura 2 muestra los elementos básicos de un sensor detector de fuga de sangre, estos son al menos un diodo transmisor de luz (LED) y al menos un receptor óptico de alta sensibilidad (por lo general fotodiodos). Se hace pasar un haz de luz a través de un tubo cristalino, por el que fluye el líquido dializante, y al extremo contrario del emisor se coloca un receptor óptico que convierte la luz recibida en una señal eléctrica proporcional a su intensidad. Se procura que la influencia de luz ambiental sea mínima, por lo que suelen ir tapados o encapsulados en carcasas obscuras.

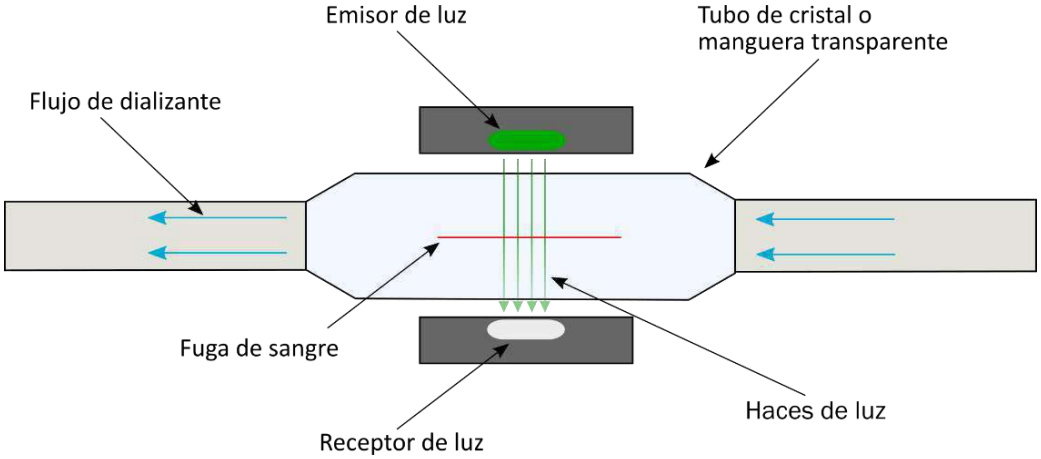


Figura 2. Diagrama simplificado de los elementos de un detector de fuga de sangre en máquinas de hemodiálisis comerciales.

Su principio de funcionamiento se basa en la ley de absorción de *Beer-Lambert*. Esta relaciona la intensidad de luz entrante con la intensidad saliente después de producirse una absorción al pasar por un medio físico. Dicha relación se define mediante la siguiente ecuación:

$$I = I_0 \cdot e^{-kl} \tag{1}$$

Donde I_0 es la intensidad de un haz monocromático que incide sobre un medio absorbente. I es la intensidad de radiación después de pasar a través del medio, k es el coeficiente de absorción y l es la longitud atravesada por el haz de luz en el medio.

Esto quiere decir que, cuando la luz (a cierta longitud de onda determinada) atraviesa una solución, esta es absorbida proporcionalmente a la concentración de la solución y a la longitud de la trayectoria de la luz. En otras palabras, si conocemos l y k, la concentración de la sustancia puede ser deducida a partir de la cantidad de luz entrante.

La forma de implementar este principio sobre los detectores de fuga de sangre consiste en calibrar el sensor haciendo incidir un haz cuando el tubo transparente o de cristal está lleno de líquido dializante y medir la cantidad de luz que llegó al receptor. Cualquier variación negativa de la intensidad de luz recibida significa que existe mayor absorbancia y por lo tanto se trataría de una fuga de sangre.

Existen variaciones para lograr el mismo objetivo, por ejemplo, en ocasiones se usan dos emisores con distinta longitud de onda (distintos colores), la solución va a tener diferentes absorbancias para esas longitudes de onda, por lo que una se utiliza como punto de referencia. También se suelen implementar dos receptores, para que uno reciba la luz después de pasar por el tubo cristalino lleno de dializante y el otro receptor reciba la luz directamente sin pasar por un medio, el último se toma como un punto de referencia.

3. Diseño Conceptual.

Para el sensor propuesto se usa un LED bicolor (rojo y verde) y un fotodiodo como receptor. Se usan estos dos colores porque, de acuerdo a los estudios de espectrometría que se han realizado sobre muestras de sangre [3], esta presenta un mayor nivel de absorción para los colores más cercanos al azul y uno menor para los cercanos al rojo, de ahí su característico color. Al tener dos colores que tienen un nivel de absorción contrastante, se tiene un mayor control sobre la detección o no de una fuga de sangre, esto sucede cuando el nivel de intensidad disminuye en uno (el LED verde) y el otro no (el LED rojo).

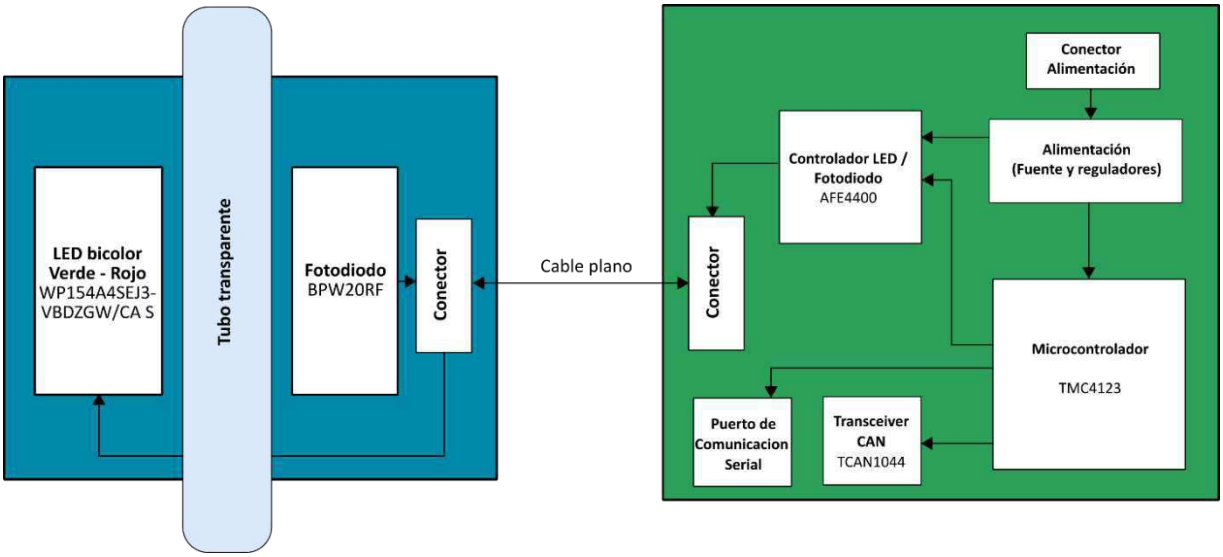


Figura 3. Diagrama a bloques del diseño conceptual del sensor.

En relación al diseño electrónico, se estructura en tres tarjetas distintas. La primera de ellas aloja el diodo LED bicolor, mientras que la segunda alberga el fotodiodo. Estas tarjetas se posicionan en extremos opuestos dentro de una carcasa con tapa, con el fin de minimizar cualquier posible influencia de la luz ambiental. La tercera tarjeta es la de control, tiene como función principal recibir y procesar los datos provenientes del fotodiodo, además de gestionar el funcionamiento del LED. Esta tarjeta cuenta con un microcontrolador como unidad de procesamiento.

Para la gestión del fotodiodo y el LED bicolor se utiliza un circuito integrado con el número de parte *"AFE4400"* de la marca Texas Instruments. Aunque el fabricante originalmente lo recomienda para aplicaciones relacionadas con la medición del nivel de oxígeno en la sangre y la frecuencia cardíaca, su función general es controlar dos LEDs de salida y un fotodiodo de entrada, que se ajusta perfectamente a esta aplicación. Este componente ofrece una gama de funciones adicionales que son:

La regulación de la intensidad de corriente de los LEDs, la capacidad de alternar su encendido de manera programada, la conversión de la corriente generada por el fotodiodo en señales de voltaje, la opción de amplificar o atenuar estas señales según sea necesario, la capacidad de compensar los

efectos de la luz ambiental no deseada y la conversión precisa de señales analógicas a valores digitales. Cabe destacar que el control total sobre todas estas funciones es mediante una interfaz de comunicación SPI *(Serial Peripheral Interface*).

El microcontrolador pertenece a la familia *TIVA*, también de la marca Texas Instruments, con número de parte TMC4123GH6PM. Este componente está equipado con todos los periféricos esenciales requeridos para esta aplicación específica. Incluye un módulo de comunicación serial y otro de comunicación SPI, que son fundamentales para el control eficiente del circuito integrado *AFE4400*, tal como se mencionó anteriormente.

Adicionalmente, la tarjeta electrónica incorpora un transceptor de comunicación CAN *(Controller Area Network)*, lo que amplía significativamente su versatilidad y capacidad de integración. Esta característica permite que el sensor sea escalable y adaptable para su uso en sistemas de hemodiálisis más completos.

4. Desarrollo del Sensor.

4.1 Desarrollo de Hardware.

Se diseñaron y fabricaron tres tarjetas electrónicas en total, que en conjunto formaban el sistema completo. La primera es para colocar el LED bicolor, la segunda el fotodiodo y la tercera era la tarjeta de control.

Figura 4. A la izquierda los modelos 3D de las tarjetas del fotodiodo y el LED. A la derecha las tarjetas fabricadas.

El proceso inició con la selección de componentes para varios circuitos, incluyendo reguladores de voltaje, la fuente principal de energía, conectores y otros componentes pasivos esenciales. Una vez establecida esta base, se procedió al diseño de los esquemáticos de los circuitos electrónicos correspondientes, posteriormente, se avanzó en el diseño de los circuitos impresos y finalmente, se llevó a cabo la fabricación y el ensamblaje de estas tarjetas electrónicas.

Es importante destacar que todas las tarjetas siguen un diseño de dos capas. En particular, las tarjetas que alojan el diodo LED y el fotodiodo comparten las mismas dimensiones, con medidas de 33.8mm x 19.0mm. Las dimensiones del prototipo de la tarjeta de control fueron de 117.25mm x 78.61mm.

La figura 4 y la figura 5 presentan imágenes en 3D de las tarjetas, mostrando el diseño y el resultado final después de producir los respectivos prototipos.

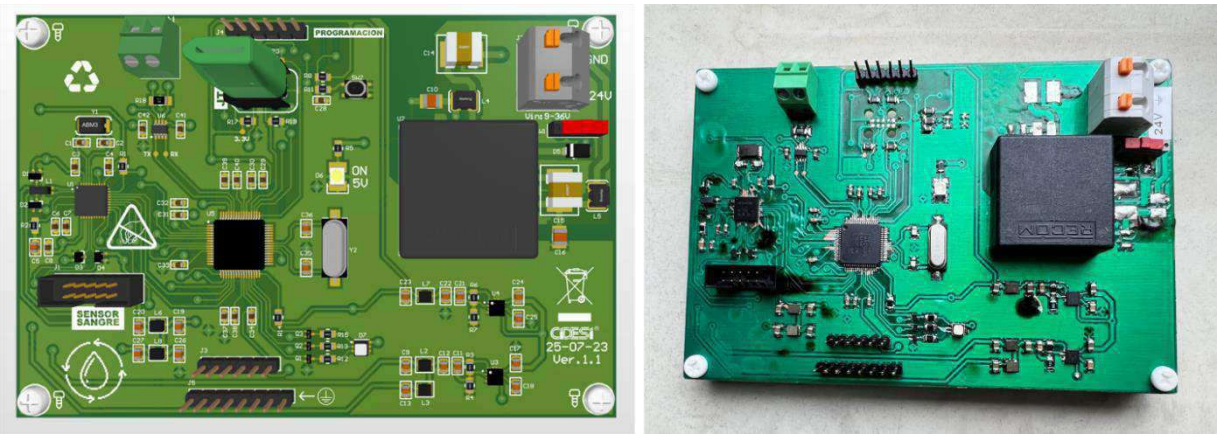


Figura 5. A la izquierda el modelo 3D de la tarjeta de control. A la derecha la tarjeta de control fabricada y con sus componentes ensamblados.

4.2 Desarrollo de Firmware.

El código de firmware para el microcontrolador está escrito en lenguaje C. Se utiliza la librería llamada "*TIVAWare*" para el acceso a sus periféricos, que es especial para esa familia de microcontroladores y la cual facilita la implementación de funciones de bajo nivel. La arquitectura del código se puede observar en la figura 6.

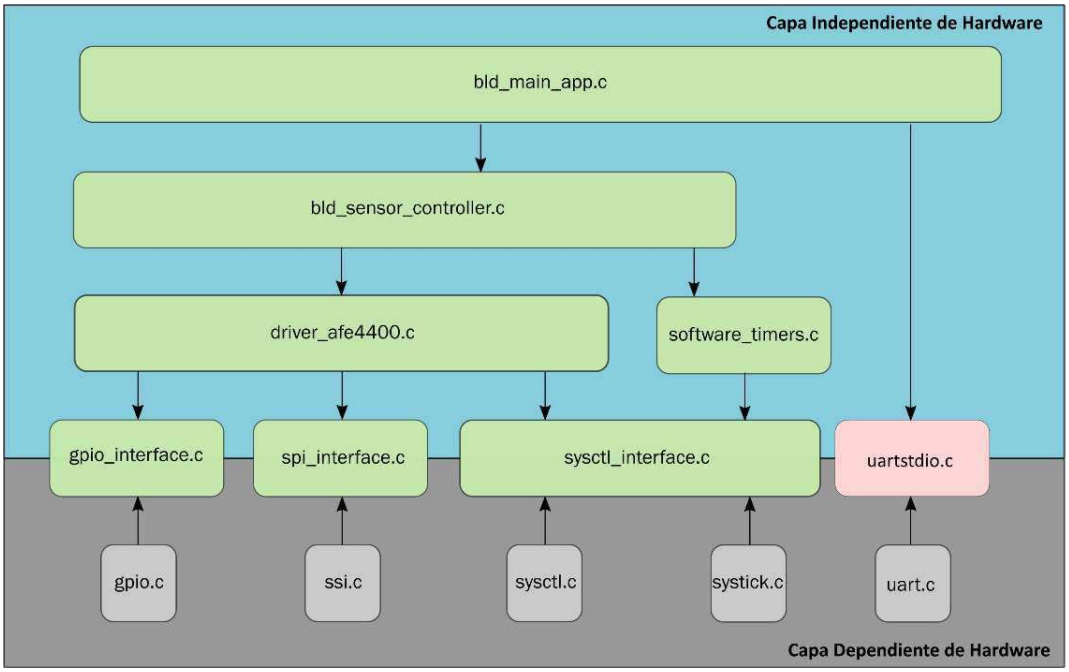


Figura 6. Arquitectura del código del microcontrolador del sensor.

El código se organiza en módulos individuales, cada uno de los cuales desempeña una función específica en el sistema. Estos módulos se dividen en tres categorías distintas por su color de identificación. Los módulos de color gris son parte integral de la librería *TIVAware*, los de color verde representan implementaciones desarrolladas internamente, mientras que los módulos de color rojo forman parte de un conjunto de utilerías proporcionadas por el fabricante.

Un grupo de estos módulos está diseñado para actuar como interfaces, facilitando la comunicación entre la capa de hardware independiente y la capa dependiente. Estos módulos de interfaz se identifican fácilmente por el sufijo *"interface*" que llevan en su nombre.

En los módulos de alto nivel, el prefijo *"bld"* indica su relación con el *"blood leakage detector"* o detector de fuga de sangre en español. A continuación se muestra una descripción detallada de las funciones que desempeña cada uno de estos módulos, con el objetivo de ofrecer una visión completa de su contribución al sistema.

- *gpio_interface*: Inicializa los pines del MCU, configurándolos como entrada o salida, digital o analógica, o asignándoles funciones secundarias de hardware. También se encarga de habilitar, deshabilitar y borrar las interrupciones por pines, así como registrar las funciones de manejo de interrupciones en la tabla de vectores del MCU. Además, permite encender o apagar los pines digitales y leer el valor de las entradas digitales.

- *spi_interface*: Inicializa el módulo de comunicación SPI del MCU. Lleva a cabo la limpieza de la memoria FIFO del periférico y facilita la transmisión, recepción o transferencia de buffers de bytes de datos por el puerto previamente configurado para la comunicación SPI.

- *sysctl_interface*: Inicia el reloj del MCU, la interrupción maestra y el temporizador del sistema, que se basa en el reloj principal y puede implementar retardos por una cantidad específica de milisegundos.

- *software_timers*: Utiliza el temporizador del sistema, controlado por "*sysctl_interface"*, para implementar temporizadores por software. Puede crear y borrar temporizadores, iniciarlos o detenerlos, leer el valor actual de su conteo y ejecutar funciones de retrollamada al finalizar el conteo. Este módulo resulta especialmente útil para funciones que requieren una base de tiempo que no interrumpa el flujo del programa.

- *driver_afe4400*: Actúa como controlador del circuito integrado "AFE4400". Inicializa el hardware del circuito integrado, inicia sus registros a un valor definido y se encarga de habilitar, deshabilitar y borrar las interrupciones por pines que este pueda generar. Además, permite registrar funciones de retrollamada para las posibles interrupciones, leer y escribir directamente valores en los registros del circuito integrado, leer todos sus registros en una sola ejecución, cambiar el valor de corriente de los LED conectados al circuito integrado, modificar el valor de resistencia de su amplificador de transimpedancia y leer los resultados del convertidor analógico digital de las lecturas del fotodiodo.

- *bld_sensor_controller*: Implementa las funciones directamente relacionadas con el detector de sangre. Puede encender o apagar el sensor, iniciar y detener la medición de la intensidad de los LEDs, configurar sus parámetros, como las corrientes de los LED y el factor de amplificación de entrada, y llevar a cabo una calibración automática. Esta calibración automática busca encontrar los valores óptimos de los parámetros de configuración y los valores de referencia de detección, que son las intensidades de los LED que se registran al finalizar la calibración y se deben considerar como referencia. Asimismo, este módulo establece los límites de detección, es decir, los valores que determinan si se ha detectado sangre o no. Además, puede leer muestras individuales de las intensidades de los LED, guardarlas en buffers y controlar la compensación de luz ambiental.

- *bld_main_app*: Esta función principal inicia el hardware del sensor y lleva a cabo el procedimiento de encendido. Luego, inicia automáticamente la calibración, calcula los valores de referencia de detección y sus límites. Finalmente, inicia un bucle infinito que llama a la función de proceso de detección. Esta función adquiere los valores de intensidad de los LED, los compara con los límites previamente calculados y, si superan estos valores, activa una variable de alarma. Simultáneamente, se encarga de imprimir todos los valores leídos por el puerto serial, utilizando el módulo "*uartstudio*", para su visualización o almacenamiento externo.

5. Pruebas y Experimentación.

El diagrama del sistema para verificar el funcionamiento del sensor se muestra en la figura 7. Consiste en un recipiente que contiene una solución de agua con sangre simulada, la cual es un concentrado de colorante vegetal. Se realiza de esta forma ya que el manejo de sangre real requiere de un cuidado especial para evitar su coagulación, sin mencionar que, en caso de ser sangre humana, se requieren de permisos especiales, y al final, la propiedad física que el sensor mide es, indirectamente, el color.

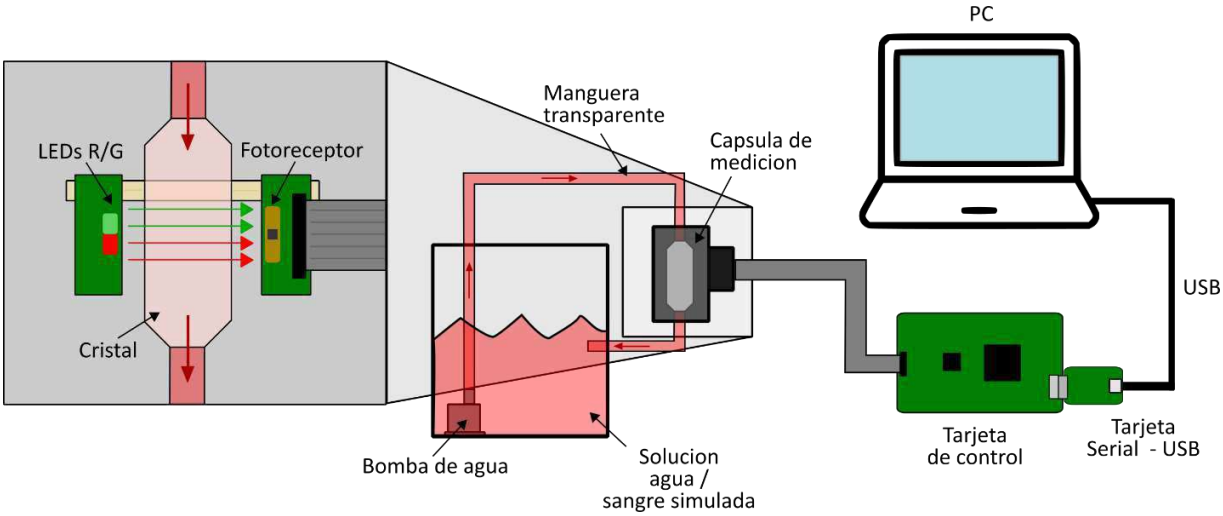


Figura 7. Diagrama de los componentes para realizar las pruebas.

Dentro del recipiente se coloca una bomba de agua sumergible de 12V para mantener un flujo constante de *1500 ml/min +/-10%*. Esta bomba hace subir el fluido por una manguera transparente hasta la cápsula de medición, que contiene un tubo de cristal transparente en su interior. Se usa una tapa para evitar la entrada de luz ambiental. Dentro de la cápsula se ubican las tarjetas electrónicas del LED bicolor y del fotodiodo, una enfrente de la otra. La luz de los LEDs se controla por intervalos, para permitir que el fotodiodo genere una corriente de salida para cada uno de los haces. Las señales procedentes del fotodiodo se transmiten por un cable plano hacia la tarjeta de control. Ahí el circuito integrado *AFE4400* convierte el voltaje medido en un valor digital por medio de su ADC y lo transmite al microcontrolador utilizando la comunicación SPI.

La configuración para el circuito integrado se muestra en la tabla 1:

Tabla 1. Parámetros de configuración del circuito integrado AFE4400.

Parámetro de Configuración	**Valor**
Corriente LED1.	8 mA
Corriente LED2.	15 mA
Modo de Operación.	"*Push-pull*"
Resistencia de retroalimentación de amplificador de transimpedancia (TIA).	25 KΩ
Capacitor del amplificador de transimpedancia (TIA).	5 pF
Frecuencia de corte del filtro pasa bajos.	500 Hz

La razón por la cual los LED tienen un valor de corriente distinto se debe a que, según su hoja de datos, él LED usado (número de parte *WP154A4SEJ3VBDZGW/CA*) tiene niveles de luminosidad

distinta para el color rojo y verde alimentados con la misma corriente, siendo menor para el primero, por lo que, al hacer el proceso de calibración automática, se compensa esta diferencia.

El microcontrolador procesa los datos proporcionados por el circuito integrado de interfaz y los transmite a través de su puerto de comunicación serial. En este punto, se introduce una tarjeta de interfaz externa Serial-USB que, a su vez, se conecta a un ordenador. En el ordenador, se configura el software *"CoolTerm"* para recibir los datos a través de un puerto COM específico y almacenarlos en archivos con extensión *".csv"*.

Una vez que todas las muestras han sido recolectadas, se pone en marcha un programa desarrollado en el entorno del software *"MATLAB"*. Este programa se encarga de procesar todos los archivos en formato ".csv" que contienen los datos experimentales. Su tarea principal consiste en abrir cada uno de estos archivos, organizar la información en función del tipo de LED correspondiente, y posteriormente, agrupar estos datos de manera coherente. Al finalizar este proceso, el programa genera gráficos representativos que muestran los resultados obtenidos en el experimento.

Figura 8. Cápsula de medición. A la izquierda vacía y a la derecha con solución de prueba.

Se hicieron pruebas con diferentes niveles de concentración de sangre simulada. El objetivo era verificar si el diseño propuesto era capaz de diferenciar tonalidades muy bajas de sangre simulada disuelta en agua. Se prepararon soluciones con 12 niveles distintos de concentración.

Por cada solución (cada una con un porcentaje de concentración) se tomaron 16,384 muestras a una taza de 500 Hz. Con cada muestra se obtenían dos datos, es decir, lo que captaba el fotodiodo cuando cada uno de los LED está encendido por separado. Al finalizar la prueba se tenían un total de 196,608 muestras de cada LED.

6. Resultados.

La figura 9 muestra de manera gráfica los resultados obtenidos durante el experimento. En esta representación, los colores de las líneas (rojo y verde) reflejan las intensidades medidas para los respectivos LEDs. Cada punto en estas líneas representa el promedio de las 16,384 mediciones realizadas al circular cada una de las 12 soluciones que contenían concentrado de sangre simulada.

En el eje horizontal, se encuentran representados los porcentajes volumen-volumen (% v/v), que expresan el volumen del soluto (en este caso, el colorante rojo vegetal o la sangre simulada) por cada cien unidades de volumen de la disolución (agua). Por otro lado, en el eje vertical se indican los valores

en voltios (Volts), correspondientes a las mediciones realizadas por el circuito integrado *AFE4400* de las intensidades de los LEDs.

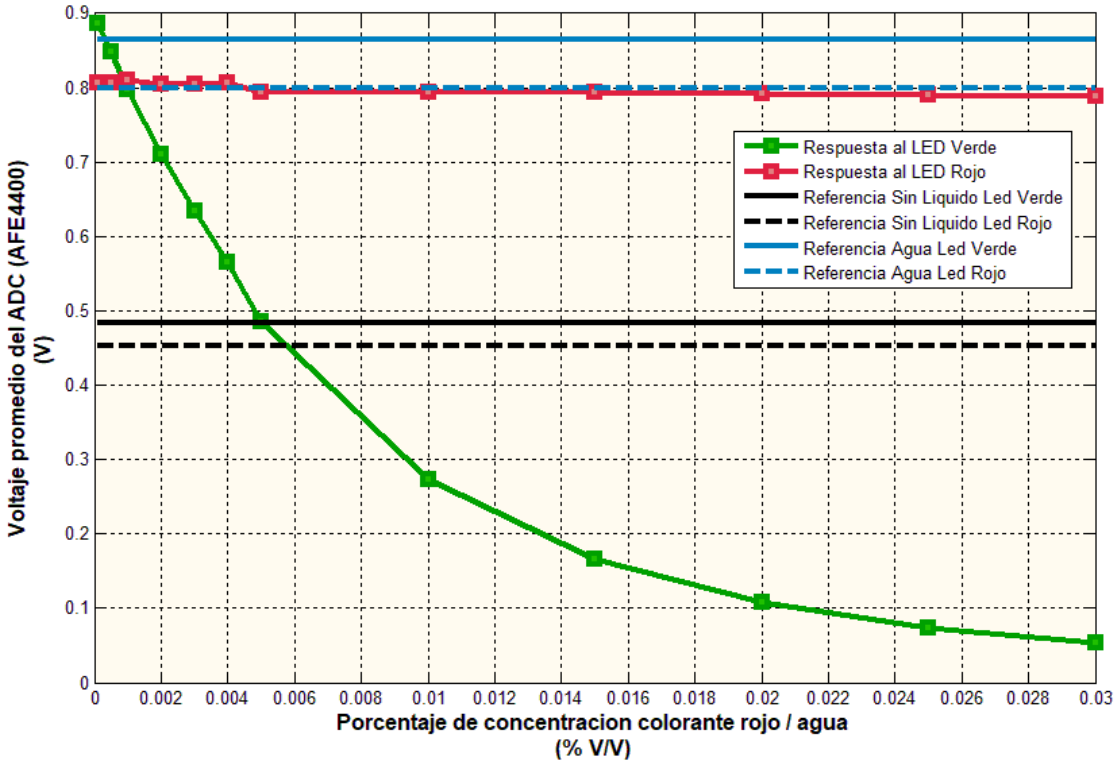


Figura 9. Respuesta del fotodiodo a la luz de los LED a distintas concentraciones de muestra.

Para proporcionar un punto de referencia, en la gráfica se incluyen dos conjuntos de líneas adicionales. Las líneas en color azul representan la respuesta del sensor cuando el tubo de cristal en la cámara de medición estaba lleno con agua, mientras que las líneas en color negro ilustran las mediciones cuando el tubo se encontraba vacío o sin líquido. Las líneas punteadas corresponden a la intensidad medida del LED rojo, mientras que las líneas continuas reflejan la intensidad del LED verde. Estos conjuntos de líneas se incorporaron en la gráfica para facilitar la comparación de resultados.

6.1 Diferencias en la Respuesta de los LED.

Al analizar los datos, se observa que, a medida que aumenta la concentración de sangre simulada, la tensión medida por el fotodiodo disminuye de manera significativa para el LED verde. Sin embargo, en el caso del LED rojo, no se aprecia un cambio sustancial a medida que se incrementa la concentración.

A simple vista, podría parecer que la respuesta del LED rojo no proporciona información relevante para determinar la presencia o ausencia de sangre simulada. Sin embargo, este no es el caso, ya que basar la decisión únicamente en la respuesta del LED verde podría conducir a falsos positivos. Es decir, podríamos detectar sangre simulada cuando en realidad el tubo de medición está vacío, tal como se evidencia en las líneas negras de la gráfica.

Esto subraya la importancia de considerar ambas respuestas, la del LED verde y la del LED rojo, para tomar decisiones precisas en la detección de sangre simulada en el sistema. La información proporcionada por el LED rojo se vuelve esencial para evitar resultados incorrectos y garantizar una detección confiable de la presencia de sangre simulada en el tubo de medición.

7. Conclusiones.

A partir de los resultados obtenidos durante la experimentación se puede concluir que el sensor propuesto genera salidas claramente distintas cuando la cápsula de medición está en presencia de agua, cuando está vacía y cuando se le añaden diferentes niveles de solución de concentrado de sangre simulada. Esta habilidad para discernir entre estos tres estados es fundamental para la funcionalidad de un detector de fugas de sangre.

Se comprueba que la sangre simulada tiene un índice de absorción distinto para dos longitudes de onda de la luz (rojo y verde en este caso) y que si, aparentemente, la intensidad del LED rojo no cambia para distintos niveles de concentrado de sangre simulada, se puede utilizar dicha información como un punto de referencia para evitar falsos positivos y permitir un mayor control en la detección de fugas de sangre y que sea más confiable.

Una limitación de este trabajo fue la incapacidad de realizar pruebas con sangre real debido a las complejas consideraciones técnicas y éticas. Sin embargo, un trabajo a futuro es verificar el funcionamiento del mismo sensor utilizando sangre animal en condiciones similares. La comparación de resultados entre pruebas con sangre real y las obtenidas con sangre simulada podría proporcionar información valiosa sobre la efectividad del sensor en un entorno más realista.

Este trabajo contribuye en mejorar la accesibilidad y disponibilidad de información en tecnologías implementadas en máquinas de hemodiálisis, que a menudo se ve limitada debido a la naturaleza del mismo tratamiento.

Agradecimientos.

Este trabajo fue soportado por el proyecto de CONAHCYT 322623 denominado Laboratorio Nacional de Investigación y Tecnologías Médicas.

Referencias.

[1] Csaba P. Kovesdy. "*Epidemiology of chronic kidney disease*", *Kidney International Supplements*. Volumen 12, pp. 7 – 11, 2022.
[2] Vasquez Jimenez E. "*Global Dialysis Perspective: Mexico". Kidney360*, pp 534 – 53, 2020.
[3] W. G. Zijlstra, A. Bursma. *"Spectrophotometry of Hemoglobin: Absorption Spectra of Bovine Oxyhemoglobin, Deoxyhemoglobin, Carboxyhemoglobin, and Methamoglobin" Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemestry and Molecular Biology*. Volumen 118, pp. 743 – 749, 1997.
[4] Ravagli E. *"Sensor technologies for on-line monitoring of biological parameters during hemodialysis".* Tesis de doctorado, Universidad de Bologna, 2017.
[5] Herrero Hidalgo S. Rebeca Cañada A. Lopez Miravalles A. Principios Físico - Químicos de la Hemodiálisis. Libro de Comunicaciones SEDEN, pp. 399 – 400, 2006.
[6] Allen R. Nissenson. Richard N. Fine. "*Handbook of Dialysis Therapy"*. Elsevier, Philadelphia, 5ta edicion, 2017.
[7] H. -C. Chuang, C. -Y. Shih, C. -H. Chou, J. -T. Huang and C. -J. Wu. *"The Development of a Blood Leakage Monitoring System for the Applications in Hemodialysis Therapy," IEEE Sensors Journal,* vol. 15, no. 3, pp. 1515-1522, 2015.
[8] Fernandez Lucas M. Teruel Briones JL. Tecnicas de hemodiálisis. Nefrologia al día. Pp. 2659 – 2606. 2023.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 40, pp. 516 – 531
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Uso de un robot neumático como equipo didáctico con actuadores discretos

Romero Maldonado José Emmanuel, Calixto Zamorano Luis Arturo, Mora Zamora Kenyon Jared, José Luis Avendaño Juárez, Capetillo Reséndiz Guadalupe, Dimas Talavera Velázquez y Juan Manuel Ramos Arreguín✉

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería
✉juan.ramos@uaq.edu.mx

Resumen

En la academia, son pocos los equipos a los que un estudiante tiene acceso para implementar técnicas de control, debido a que son equipos comerciales y el hardware es más una caja negra a la cual no hay manera de modificar, limitando el aprendizaje a ser solamente un usuario y la programación de tareas. En este trabajo se presenta el uso de un robot neumático con fines didácticos, de manera que el estudiante debe realizar la implementación del controlador con la finalidad de que éste realice una tarea específica. Se implementa un caso de estudio donde el robot es usado para la clasificación de bloques, y el resultado obtenido es satisfactorio y el margen de error es menor a 2% en el posicionamiento. Para la activación de los actuadores neumáticos, se usan electroválvulas 5/3. Este trabajo es un buen aporte para complementar los conocimientos de electrónica, programación y control bajo ambientes controlados.

Palabras clave: Robot neumático, actuadores neumáticos, equipo didáctico, CONTROL, aplicaciones de la robótica.

1. Introducción

En la actualidad, el desarrollo de robots tiene una gran importancia en la vida cotidiana, desde robots de uso doméstico hasta robots de tipo industrial. Sin embargo, la gran mayoría de robots usa actuadores de tipo eléctrico como los mostrados en la figura 1, siendo mucho menos empleados los actuadores de tipo neumático, como los mostrados en la figura 2.

(a) (b) (c) (d)

Figura 1. Actuadores eléctricos. (a) Actuador lineal[1]. (b) Servomotor eléctrico[2]. (c) Miniservomotor[3]. (d) Microservomotor[4].

[1] https://static10.gestionaweb.cat/1301/pwimg-1024/a24-actuador-electric-02-1173273.jpg
[2] https://www.ricardovela.com/es/content/13-reparacion-de-servomotores
[3] https://www.edeala.com.mx/2-mini-servomotores-engranaje-300rpm-12v-motor-rc-robotica-200229.html#popup1
[4] https://cdn.littlebird.com.au/images/files/000/079/074/large/PL-2143.jpg?1535768010

(a) (b) (c)

Figura 2. Actuadores neumáticos. (a) Cilindro con vástago[5]. (b) Motor neumático[6]. (c) Actuador lineal con sistema de medición[7].

Los actuadores eléctricos tienen la ventaja de ser más fáciles de controlar, a comparación de los actuadores neumáticos. El principal inconveniente de los actuadores neumáticos es su comportamiento altamente no lineal debido a las propiedades físicas de compresibilidad y expansibilidad, lo que lo convierte en un sistema difícil de controlar por su comportamiento.

Debido a esto, existe una gran variedad de trabajos enfocados a controlar el comportamiento de sistemas neumáticos. El desarrollo de robots neumáticos no es algo nuevo, Teli desarrolla y presenta un robot neumático manipulador para tomar y colocar cilindros [1]. El control de posición se basa en el uso de reguladores de flujo de aire. Así mismo, se presenta el análisis y control de un brazo manipulador con actuador neumático flexible [2], validando el análisis teórico con resultados prácticos. También se han presentado trabajos relacionados con el diseño de robots manipuladores neumáticos de bajo costo [3].

El diseño y desarrollo de robots neumáticos consideran actuadores lineales y rotatorios, para lo cual ha sido necesario el desarrollo de controladores, como el presentado en [4], donde se desarrolla un controlador de alta precisión para un actuador neumático rotatorio.

También se han desarrollado diversos robots neumáticos, como los presentados en [5] y [6] donde se muestra el diseño de un robot neumático de 6 grados de libertad, incluyendo el diseño de las interfaces de potencia y digitales. En [7] se presenta un sistema de monitoreo y servidor WEB utilizando un sistema embebido Raspberry Pi, para el control y monitoreo de un robot neumático.

El presente trabajo es una continuación del presentado en [6], donde el robot desarrollado es usado con fines educativos, donde los estudiantes deben controlar el movimiento del robot para que realice una tarea en particular.

El uso de robots didácticos es siendo empleado en la enseñanza de diversas disciplinas en las universidades, como lo presentado en [8], donde un brazo manipulador didáctico es usado en cursos de ingeniería industrial. También se puede emplear para el aprendizaje de automatización y la industria 4.0 [9].

Desde el punto de vista didáctico, es importante el poder contar con equipos que puedan ser modificados y programados desde cero por los estudiantes, para adquirir el conocimiento y la experiencia que solamente se puede desarrollar a través de la práctica.

Dado que se cuenta con un robot neumático de 6 grados de libertad, presentado en [6] y [7], se presenta este trabajo para mostrarlo como una alternativa de la asignatura de automatización, para que los estudiantes implementen un proceso de clasificación de objetos, por su tamaño y color. A continuación, se habla más a detalle de este trabajo.

---

[5] https://www.festo.com/mx/es/c/productos/automatizacion-industrial/actuadores/cilindros-neumaticos/cilindros-con-vastago-id_pim215/

[6] https://www.grainger.com.mx/producto/SPEEDAIRE-Motor-Neum%C3%A1tico,-0-93-HP,-Montaje-Cubo,-Di%C3%A1m-del-Eje-1-2%22,-Tama%C3%B1o-del-Puerto-1-4%22-NPT/p/22UX43

[7] https://www.festo.com/mx/es/p/actuador-lineal-con-sistema-de-medicion-de-recorrido-id_DDLI/?q=~:festoSortOrderScored

2. El robot neumático

El desarrollo de robots neumáticos es un área de conocimiento que se encuentra en desarrollo. Tradicionalmente, en el desarrollo de robots manipuladores se usan actuadores eléctricos, debido a que son fáciles de controlar, pero su principal desventaja es su baja relación potencia/peso. Es decir, se requiere de mucha energía para mover poco peso, además de ser muy caros. Por otro lado, los actuadores neumáticos tienen una alta relación potencia/peso, pero son difíciles de controlar debido a su comportamiento altamente no lineal.

Trabajar en el desarrollo de robots neumáticos, implica un reto bastante alto, pero una gran oportunidad para el desarrollo de controladores y de sistemas que permitan controlar la posición de un actuador neumático. Debido a esto, que el estudiante trabaje en la programación de un robot le permite adquirir experiencia y conocimientos que, de otra manera, es complicado adquirir, y más aún si los actuadores son del tipo neumático.

En la figura 3 se muestra el robot neumático usado en este trabajo, previamente desarrollado en [6], y en la figura 4 se muestran los grados de libertad (DOF, Degree of Freedom) implementados, los cuales son 6.

Figura 3. Robot neumático de 6 grados de libertad [6].

Figura 4. Grados de libertad usados en el robot neumático [6].

El robot mostrado en la figura 3 y en la figura 4, está construido usando los siguientes elementos de hardware.

- Compresor de aire
- 3 actuadores neumáticos rotatorio
- 3 actuadores neumáticos lineales
- 6 electroválvulas 5/3
- Reguladores de flujo de aire
- Mangueras

El compresor de aire permite almacenar el aire a presión, y es lo que va a generar la fuerza necesaria para producir los movimientos en el robot. El compresor es un equipo comercial, de fácil adquisición.

Los actuadores neumáticos rotatorios son, básicamente, motores cuyo movimiento se genera por la fuerza del aire. Estos actuadores se usan en los grados de libertad 1, 5 y 6, de la figura 4. La figura 2(b) muestra un ejemplo de este tipo de motores. Los actuadores neumáticos lineales, se usan en los grados de libertad 2, 3 y 4, los cuales se pueden observar en la figura 4. En el 4º DOF se usan dos actuadores lineales, al considerarse que requiere más fuerza para elevar el brazo, y el resto de la estructura acoplada a este grado. Para controlar el movimiento de los actuadores del robot neumático, se usa el sistema de conexiones que se muestra en la figura 5.

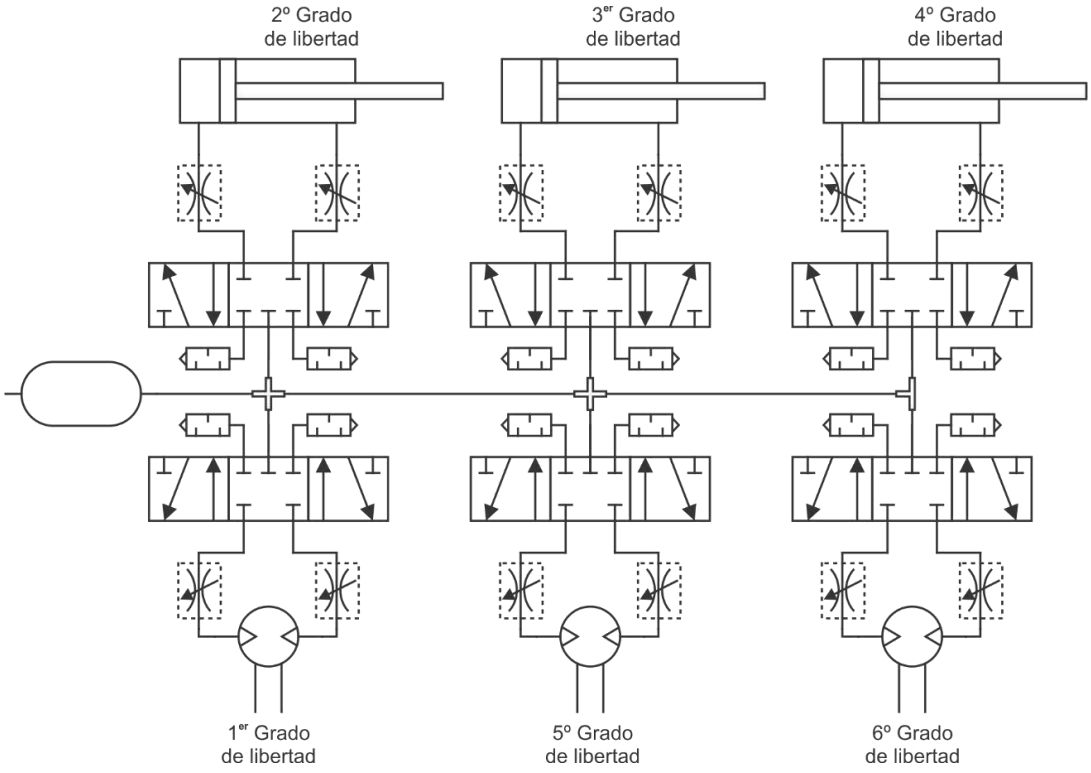


Figura 5. Diagrama simplificado del sistema neumático para el brazo manipulador.

El mayor reto en este tipo de sistemas es poder controlar el flujo de aire a presión, a través de los actuadores neumáticos lineales y rotatorios. El aire posee propiedades de compresión y expansión, por lo que se vuelve un sistema difícil de controlar, y como tal, es un reto para los estudiantes el poder realizar una tarea para un proceso específico.

3. Metodología de trabajo

En la figura 6 se muestra un diagrama a bloques que muestra la metodología usada en el desarrollo de la implementación de un control al robot neumático, para desempeñar una tarea en particular.

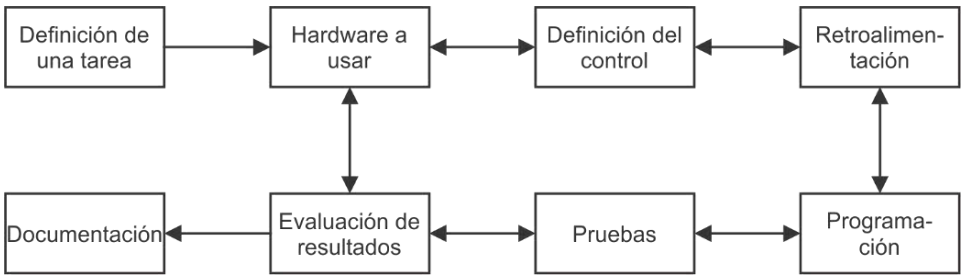


Figura 6. Metodología de trabajo para usar el brazo manipulador neumático.

3.1 Definición de una tarea

Como caso de aplicación, el estudiante debe usar el robot manipulador para clasificar diversos bloques, por su tamaño, de manera que se simula un proceso de clasificación de productos industriales. Los bloques a usar se muestran en la figura 7, donde se pueden apreciar bloques de 4 colores (rojo, azul, verde y gris) y 3 tamaños diferentes.

Figura 7. Ejemplo de bloques para utilizar en el proceso de clasificación.

3.2 Hardware a usar

Para el desarrollo del proyecto se requiere el uso de los componentes mostrados en la tabla 1. Las electroválvulas 5/3 son usadas para controlar la entrada y salida de aire a los actuadores neumáticos. La figura 8 muestra una de las electroválvulas 5/3 que están siendo usadas en el trabajo.

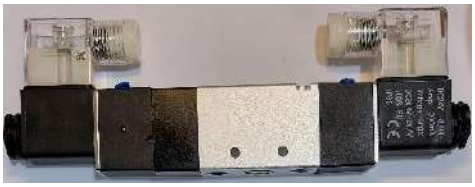


Figura 8. Electroválvula 5/3 usada en el robot neumático.

Tabla 1. Hardware usado en el robot neumático

No. De Piezas	Descripción	Modelo
6	Electroválvula 5/3 Heschen, 12V, 230 mA	4V230C-08
1	Motor neumático festo	DSMI-40-270-A-B
2	Motor neumático SMC	CRB2BW15-270SZ
2	Pistones lineales SMC	CDG1KBN20-35
2	Pistones lineales SMC	CM2YC32-150
12	Reguladores de flujo de aire	Genérico
3	Sensores de posición	Potenciómetro de 10K
1	Electroimán, 12V, 1 Kg	Sin modelo
1	Estructura de robot	Fabricado
1	Sistema digital basado en microcontrolador	PIC18F4550
2	Sensores de altura por ultrasonido	HC-SR04

3.3 Retroalimentación

El algoritmo de control utilizado se diseña considerando que se tienen válvulas neumáticas “on-off”, es decir, el control que se puede aplicar es de naturaleza discreta. Se instaló un potenciómetro de una sola vuelta en la base del brazo, como se observa en la figura 9, cuyo giro es ocasionado por la acción del pistón interno (pistón 2 de la figura 4). Es decir, la lectura de su voltaje a través del ADC del microcontrolador corresponde a la posición angular del eje inferior del brazo (es el eje controlado por el pistón 2, véase la figura 4).

Figura 9. Potenciómetro de una vuelta usado como retroalimentación para el controlador.

Por otro lado, para el giro horizontal del brazo, se usa un motor neumático como actuador, el cual cuenta con un potenciómetro integrado, y de esta manera se obtiene la posición angular para usarse como retroalimentación del controlador, correspondiente al eje de giro. La figura 10 muestra el motor neumático correspondiente al primer grado de libertad, que se muestra en la figura 4.

Figura 10. Motor neumático del primer grado de libertad, con potenciómetro integrado.

3.4 Definición del control

Teniendo la información de la posición, y el control de las electroválvulas, fue entonces que se comenzó el planteamiento del algoritmo de control. Para hacer esto, se realizó un estudio de la "respuesta natural" del sistema, es decir, un algoritmo simple en el que se enciende la electroválvula una vez que se establece la posición deseada (SP del inglés set point) y se apaga una vez que el potenciómetro refleja la posición deseada. Considerando el eje de giro horizontal, se observa un comportamiento como el mostrado en la figura 11.

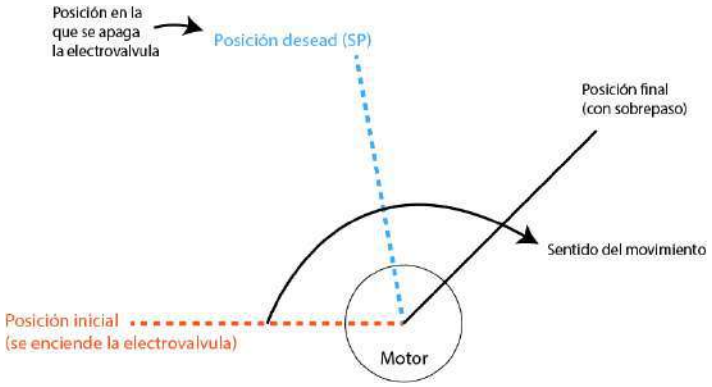


Figura 11. Respuesta natural del giro del motor neumático del grado de libertad 1 con alto sobrepaso.

En la figura 11 se observa que la inercia del movimiento ocasiona un sobrepaso considerable y el error final es muy elevado. Para corregir eso se propone un control tal que, la electroválvula se cierre antes de llegar a la posición deseada, reduciendo así el sobrepaso, como se muestra en la figura 12.

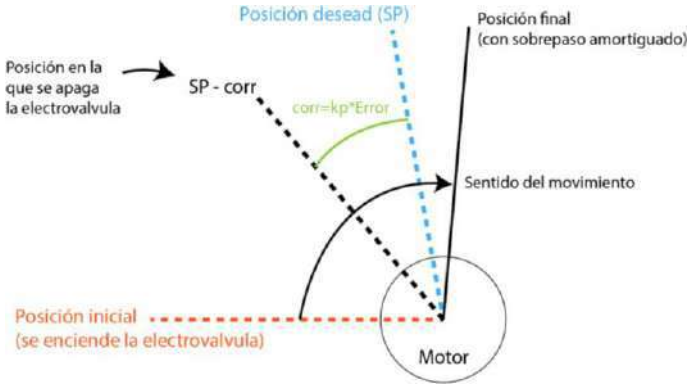


Figura 12. Respuesta natural del giro del motor neumático del grado de libertad 1 con menor sobrepaso después de haber implementado el algoritmo mencionado.

En la figura 13 se muestra la propuesta de control que ha sido implementado para el posicionamiento de los grados 1 y 2 del robot neumático. El bloque A contiene las operaciones implementadas para definir el valor de θ_{off}, que se usa para determinar el tiempo en que la electroválvula va a estar activada. En la figura 14 se muestra un diagrama a bloques simplificado para la obtención del valor de θ_{off}.

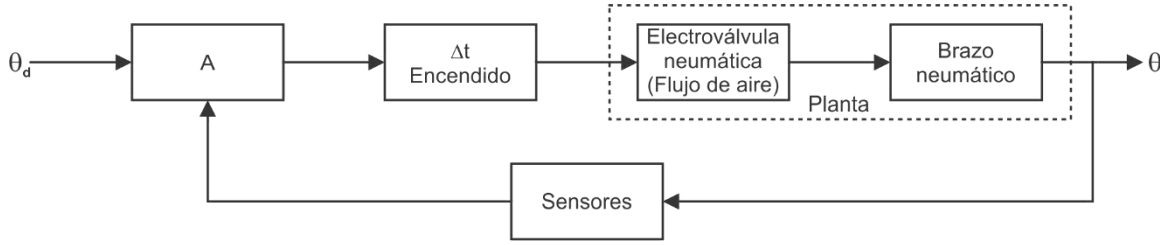


Figura 13. Diagrama a bloques de la propuesta de control.

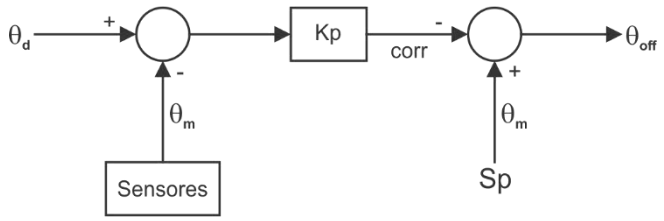


Figura 14. Cálculo del valor de θ_{off}.

3.5 Programación

Para el desarrollo del algoritmo de control, se usa una variable llamada “corr”, y que es usada para establecer el momento en que se cierra la electroválvula antes de alcanzar el SP, y que es directamente proporcional al error. Para reducir el error al máximo y programar un controlador clásico (PID, PD, PI, P), se propone un ciclo iterativo en el que se desplaza al brazo en la dirección adecuada para llegar a la posición deseada en función de la posición final que adquiera después de una acción correctiva. Es decir, para el caso del primer grado de libertad (DOF), después de establecer un valor para el SP, el brazo hace un primer movimiento en un sentido (horario o antihorario) y tiene un sobrepaso considerable en la posición que logra tras dicho movimiento, por lo tanto, tendrá que moverse ahora en sentido opuesto, llegando a una nueva posición con un sobrepaso menor al anterior. Este proceso se repetirá iterativamente hasta lograr que el error se encuentre dentro de una tolerancia establecida.

Ahora bien, para los dos ejes que se desean controlar (1er DOF giro horizontal, 2º DOF eje interno), se implementó el algoritmo descrito anteriormente. De manera experimental se sintonizaron las ganancias y tolerancias para cada controlador, de manera que se obtenga un error permisible y tolerancias tales que su efecto en el posicionamiento del brazo sea mínimo para los alcances del presente proyecto.

En este caso, el control es implementado en un microcontrolador PIC18F4550 usando los códigos 1 y 2.

Código 1. Control del motor neumático.

```
void ir_a_motor(float z)
{
      float tolerance=8,Error=100,corr,kp=0.4;

      pot_motor=prom_ADC(0,111);
      send_graph_data(pot_motor,z);

      while (Error>tolerance)
      {
         Error=abs(z-pot_motor);
         corr = kp * Error;
```

```
         if (pot_motor<(z-corr)) //giro en sentido horario
         {
            output_high(motor_levo);
            output_low(motor_dextro);
            set_adc_channel(0);
            delay_us(10);
            while (pot_motor<(z-corr))
            {
               pot_motor=read_adc();
               send_graph_data(pot_motor,z);
            }
            output_high(motor_dextro);
            pot_motor=prom_ADC(0,111);
            send_graph_data(pot_motor,z);
         }

         pot_motor=prom_ADC(0,111);
         send_graph_data(pot_motor,z);
         Error =abs(z-pot_motor);
         corr = kp * Error;

         if (Error<tolerance) //se logró la posición
         {
            delay_ms(1000);
            Error=100; //se "satura" el error para la próxima iteración
            break;
         }

         if (pot_motor>(z+corr))
         {
            output_high(motor_dextro);
            output_low(motor_levo);
            set_adc_channel(0);  //PIN 2 (A0)
            delay_us(10);
            while (pot_motor>(z+corr))  //40
            {
               pot_motor=read_adc();
               send_graph_data(pot_motor,z);
            }
            output_high(motor_levo);
            pot_motor=prom_ADC(0,111);
            send_graph_data(pot_motor,z);
         }
         pot_motor=prom_ADC(0,111);
         send_graph_data(pot_motor,z);
      }
      Error=100; //se "satura" el error para la próxima iteración
}
```

Código 1. Control del pistón neumático.

```
void ir_a_piston_inter(float z)
{
      float tolerance=5.5,Error=100,corr_up,corr_down,kp_up=0.05,kp_down=0.2;

      pot_pis2=prom_ADC(1,111);
      send_graph_data(pot_pis2,z);
      Error= abs(z-pot_pis2);
      corr_up = kp_up * Error;
      corr_down = kp_down * Error;

      while (Error>tolerance)
      {
         if (pot_pis2<(z-corr_up))   //CONTROL UP
         {
            output_high(pis2_down);    //se enciende la electrovalvula
            output_low(pis2_up);
            set_adc_channel(1);
            delay_us(10);
            while (pot_pis2<(z-corr_up))
            {
               pot_pis2=read_adc();
```

```
            send_graph_data(pot_pis2,z);
         }
         output_high(pis2_up);      //se apaga la electrovalvula
         pot_pis2=prom_ADC(1,111);
         send_graph_data(pot_pis2,z);
      }

      pot_pis2=prom_ADC(1,111);
      send_graph_data(pot_pis2,z);
      Error= abs(z-pot_pis2);
      corr_up = kp_up * Error;
      corr_down = kp_down * Error;
      if (Error<tolerance) //posición lograda
      {
         Error=100; //se "satura" el error para la próxima iteración
         break;
      }

      if (pot_pis2>(z+corr_down))     //CONTROL DOWN
      {
         output_high(pis2_up);
         output_low(pis2_down);
         set_adc_channel(1);  //PIN 2 (A0)
         delay_us(10);

         while (pot_pis2>(z+corr_down))  //40
         {
            pot_pis2=read_adc();
            send_graph_data(pot_pis2,z);
         }
         output_high(pis2_down);
         pot_pis2=prom_ADC(1,111);
         send_graph_data(pot_pis2,z);
         delay_ms(1000);
      }

      pot_pis2=prom_ADC(1,111);
      send_graph_data(pot_pis2,z);
      Error=abs(z-pot_pis2);
      corr_up = kp_up * Error;
      corr_down = kp_down * Error;
   }
   Error=100; //se "satura" el error para la próxima iteración
}
```

Como se puede observar, para el control del eje interno (2º DOF) se propusieron dos ganancias distintas y dos variables “corr” individuales, una para el caso en el que el pistón está desplazando el brazo hacia “arriba” (corr_up) y otra cuando se está desplazando hacia abajo (corr_down). Esto se hizo para compensar el efecto de la gravedad en el movimiento del eje interno, pues la gravedad se opone al desplazamiento hacia arriba y favorece el desplazamiento hacia abajo. Por lo anterior, la Kp que se usa en el movimiento ascendente (kp_up) toma un valor del 5% del SP, mientras que el valor de Kp en el movimiento descendente (kp_down) toma un valor 20% del SP. De esta manera se logra reducir el sobrepaso cuando el brazo va hacia abajo y la inercia ocasiona un “rebote” al cerrar la electroválvula.

Para el giro del motor se propone una única ganancia, debido a que el giro horizontal tiene un comportamiento aproximadamente uniforme en ambos sentidos de giro, pues está libre del efecto de la gravedad. Sin embargo, ese eje presentaba sobrepasos razonables en su respuesta natural, de ahí que su ganancia kp se establece del 40% del SP.

4. Resultados

Para el control de los actuadores neumáticos se usa el microcontrolador PIC18F4550, y para la digitalización de los sensores de posición mencionados en la sección 3.3, se usa el convertidor

analógico/digital del mismo microcontrolador, considerando el voltaje de referencia de 5V ($V_{ref} = 5V$) 10 bits de conversión y un tiempo total de muestreo de 4 segundos.

El robot neumático usado es el mostrado en la figura 15, el cual es de 6 grados de libertad. Para los propósitos del trabajo, se usan solamente dos grados de libertad, para los cuales los estudiantes deben desarrollar el sistema de control respectivo.

Figura 15. Robot neumático de 6 grados de libertad.

En la implementación del controlador para el motor neumático, se hicieron pruebas de posicionamiento. En una primera prueba, se establece el SP en 204º, iniciando en 315º. La respuesta del motor neumático se muestra en la figura 16, así como el comportamiento del error. Al final, el error está dentro del margen del 2%.

Se prueba el movimiento en sentido contrario, estableciendo el SP en 256º, con un valor inicial de 102º. La respuesta correspondiente se muestra en la figura 17 con su correspondiente gráfica del error en la respuesta.

De la misma manera, se realizaron pruebas de control para el segundo grado de libertad, con el actuador neumático lineal (eje interno). En la primera prueba, se establece el SP en 63º, iniciando el movimiento en 49º. El resultado del movimiento se muestra en la figura 18, así como el error de posición.

Finalmente, se realiza una segunda aprueba para el eje interno. Para esto, se estableció el SP en 60º, y la posición inicial del segundo grado es 67º. El resultado se muestra en la figura 19.

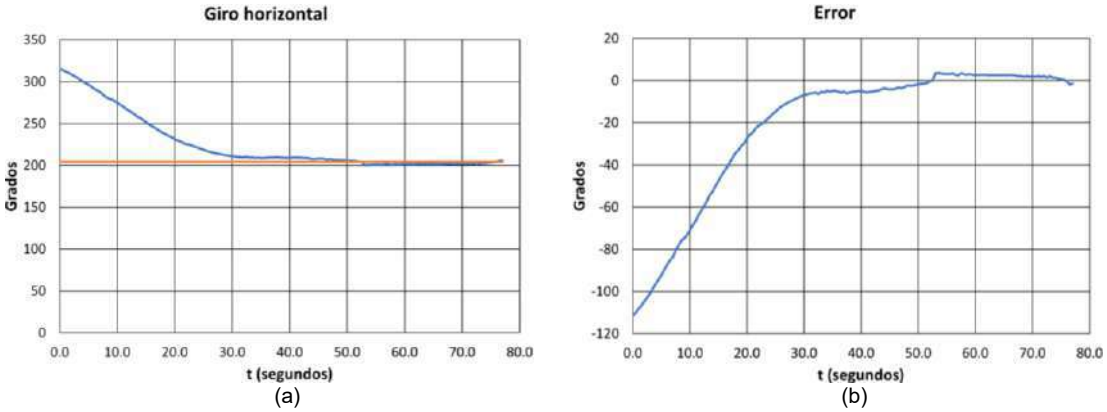
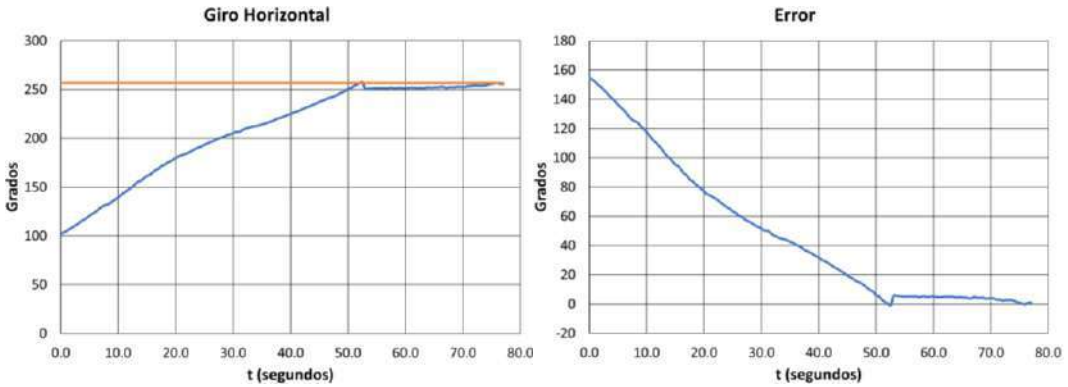
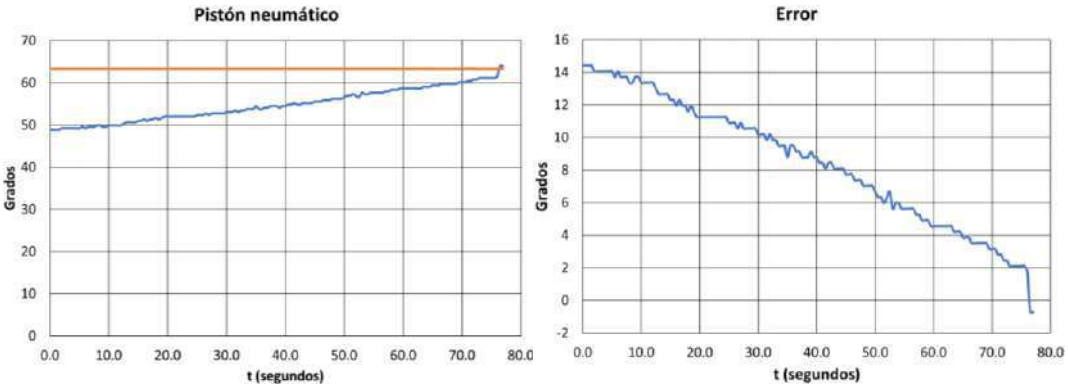


Figura 16. SP en 204º con valor inicial de 315º. (a) Respuesta del motor neumático. (b) Comportamiento del error.



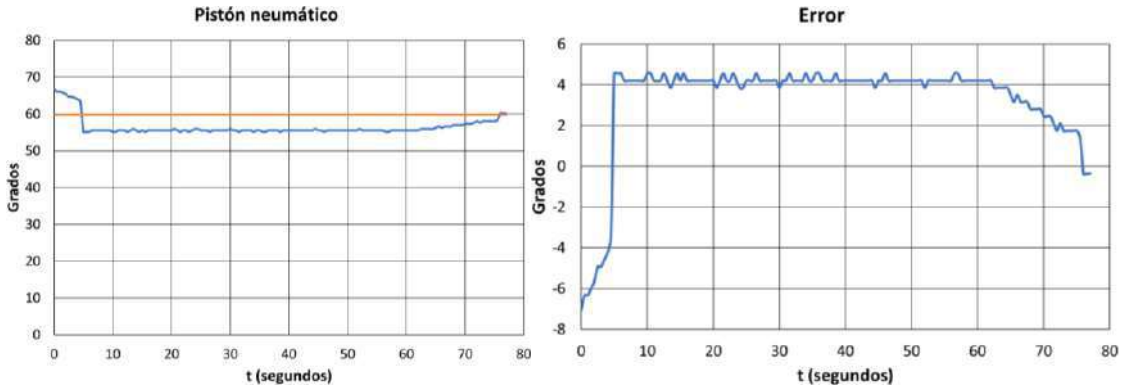
(a) (b)

Figura 17. SP en 204º con valor inicial de 315º. (a) Respuesta del motor neumático. (b) Comportamiento del error.



(a) (b)

Figura 18. SP en 63º con valor inicial de 49º. (a) Respuesta del motor neumático. (b) Comportamiento del error.



(a) (b)

Figura 19. SP en 60º con valor inicial de 67º. (a) Respuesta del motor neumático. (b) Comportamiento del error.

Por otro lado, para los demás grados de libertad se consideraron únicamente dos posiciones de control en los ejes, para el caso del 3° y °4 DOF se incorporaron interruptores límites (limit switches) que permiten saber si el pistón se encuentra extendido o no, mientras que para el °5 y °6 DOF se establecía un tiempo de apertura de las respectivas válvulas para lograr dos distintas posiciones. Lo

anterior se justifica debido a que la mayor exactitud en el posicionamiento es debida al giro horizontal (1° DOF) y el eje interno (2° DOF) siendo entonces suficientes dos posiciones para los demás DOF para lograr el objetivo de clasificar los cubos y colocarlos en sus respectivas áreas.

Una vez obtenido el controlador de cada grado, se implementa el caso de estudio, donde se van a clasificar los cubos, usando una banda transportadora, así como sensores de tamaño. La figura 20 muestra una vista general del proceso.

Figura 20. Vista general del proceso de clasificación.

La figura 21 muestra una vista de la banda transportadora, la cual se usa para desplazar los bloques hacia el sistema de medición de altura.

Figura 21. Banda transportadora para el clasificador de bloques.

La figura 22 muestra la etapa de clasificación de los bloques. Aquí se usa un sensor infrarrojo para detectar si un bloque se encuentra listo para medir la altura. La altura se mide con un sensor de ultrasonido HC-SR04.

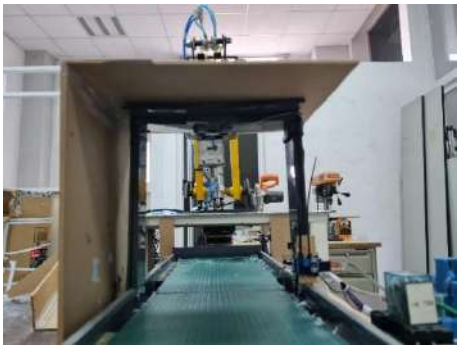


Figura 22. Etapa de medición de los bloques.

Se diseñó un sistema para controlar el robot de manera automática, o de manera manual. Esto se muestra en la figura 23.

Figura 23. Sistema digital para control automático o manual.

Para tomar las piezas, se usa un electroimán, el cual se muestra en la figura 24.

Figura 24. Electroimán como efector final para el brazo neumático.

En cuanto a lo logrado en el funcionamiento, pudimos llevar a cabo el control de los pistones para realizar los movimientos programados y los movimientos mediante el joystick (control manual). Para lograrlo, se implementa la activación de relevadores usando el microcontrolador. Esto controla los pistones, controlando el tiempo de activación con retardos. El aire como tal es un gas que se puede comprimir, por lo que no siempre es constante el movimiento, es por ello que usamos los potenciómetros, para indicarle que llegara a una posición.

No en todos los ejes se puede colocar un potenciómetro, por lo que se ajustó el caudal de la entrada y salida del aire en cada electroválvula mediante reguladores de flujo. Por esto, se hicieron calibraciones con pruebas de movimientos. Nos encontramos con el problema de que había ciertos movimientos que podrían ser considerados ‘prohibidos’ dado que el momento de la fuerza en la posición a la que llegaba se volvía complicado de superar por un solo pistón. En otras palabras, cuando el pistón interno estaba totalmente extendido y el externo totalmente retraído al igual que el par, al brazo le costaba regresar a una posición porque el peso de la estructura era demasiado y no había la fuerza suficiente para regresar de forma controlada. Ese movimiento en el control manual muestra una advertencia de ‘movimiento peligroso’ para que el usuario decida si continuar o prefiere mover otros ejes o en la dirección contraria.

El proceso programado consiste en que los cubos de madera (con una placa de metal) son colocados en la banda transportadora, llegan al sensor infrarrojo y se detiene la banda para permitirle al sensor ultrasónico detectar la distancia al cubo y así determinar su tamaño, con esto logamos

diferencias los tres diferentes tamaños de los cubos. Después, la banda continúa y llega al final de la misma para detenerse mientras espera a que el brazo lo recoja; llega el brazo y recoge el cubo sujetándolo mediante el electroimán en su placa metálica.

Finalmente, el brazo se mueve a una posición determinada dependiendo de qué cubo es. En la parte de control manual logramos hacer que mediante el joystick se pueda mover el brazo a posiciones deseadas por el usuario, el joystick es doble y permite mover cada uno de los ejes en sus dos direcciones, así como el encendido y apagado del electroimán. Para elegir el modo a usar del brazo se tiene un menú del cual se puede acceder desde el joystick.

Se puede observar en el siguiente link el video del funcionamiento tanto programado como el manual. https://drive.google.com/drive/folders/1fNpMe8iAQ_tygDn4qjEBP0lwyll21GeI

5. Conclusiones

El proyecto realizado parece simple por su explicación, pero es bastante complejo ya que incluye conocimientos del área de la neumática, así como de la electrónica y el saber manipular máquinas para llevar a cabo los diseños de las piezas o estructuras requeridas. El proyecto tiene sus principios de funcionamiento en la neumática, la cual se encarga de estudiar el comportamiento y controlar el aire comprimido el cual es proporcionado mediante un compresor. Además de utilizar la neumática para llevar a cabo los movimientos de los pistones, se requiere de algo que los active, dando así lugar a la electrónica y la programación, la cual, mediante el uso de microcontrolador, transistores, relevadores, resistencias, sensores, motores y demás elementos; nos permiten, en conjunto, lograr controlar los tiempos de activación o la posición del brazo.

La parte del peso de los materiales juega un papel muy importante para el buen control y funcionamiento del brazo, ya que llega a una posición de la cual es muy difícil regresar; esta es cuando el brazo se encuentra totalmente extendido hacia atrás, ya que es demasiado esfuerzo para un único pistón que realiza ese movimiento, lo logra hacer pero después de cierto tiempo en el que almacenó presión suficiente pero al momento de realizar el movimiento se libera de forma rápida, por lo que el movimiento llega a ser peligroso. En este caso se muestra como advertencia en el control manual, preguntando al usuario si desea seguir con el movimiento; en la parte programada no hay problema ya que no afecta al proceso.

De esta manera resulta importante aclarar que uno de los retos más destacables en el desarrollo del presente proyecto, fue el lograr una buena exactitud, precisión y repetibilidad en los movimientos del brazo neumático, así como en la determinación del tamaño de cubo, en ambos casos fue necesaria una buena integración de las herramientas físicas (electrónicos, válvulas, motores, sensores, etc.) y de la programación en sí, la correcta planeación y unión de ambas “partes” fue fundamental, esto resulta evidente en lo ya presentado hasta el momento. La complejidad y dificultad de poder predecir el comportamiento de sistemas neumáticos sometidos a cargas muy variadas fue el motivo por el cual no se pudo plantear un control que se aplicará desde los principios que rigen dichos fenómenos, es decir, controlando presiones y flujos de manera cuantitativa, sino que en este caso se utilizaron como recurso principal las herramientas proporcionadas por los microcontroladores (un PIC18F4550 para el caso presente), como lo es la habilidad de leer y analizar señales analógicas de sensores y otros componentes, en este caso, implementar potenciómetros como un medio para conocer la posición del brazo fue lo que permitió generar los algoritmos de control (apoyados de la conmutación por medio de relevadores).

Por todo lo anterior, este trabajo es un buen aporte para que el estudiante complemente de una manera práctica, los conocimientos adquiridos en las asignaturas de electrónica, programación y control bajo ambientes controlados.

En trabajo futuro, se planea usar inteligencia artificial para el control de los actuadores neumáticos, así como controladores de flujo continuos.

Referencias

[1] Teli, S. N., Bhalerao, A., Ingole, S., Jagadale, M., & Kharat, K. (2017). "*Design and fabrication of pneumatic robotic arm*". International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 8, Issue 3. ISSN 2229-5518.

[2] Aliff, M., Dohta, S., & Akagi, T. (2017). "*Control and analysis of simple-structured robot arm using flexible pneumatic cylinders*". International Journal of Advanced and Applied Sciences, 4(12), 151-157.

[3] Ahn, H. S., Jin, E., Zhu, G., & MacDonald, B. A. (2018, June). Design of Low Cost Pneumatic Robot Arm Control System. In 2018 15th International Conference on Ubiquitous Robots (UR) (pp. 151-156). IEEE.

[4] Rouzbeh, B., Bone, G., & Ashby, G. (2018). "*High Accuracy Position Control of a Rotary Pneumatic Actuator*". IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1–1. doi:10.1109/tmech.2018.2870177

[5] González Castillo Edgar Eduardo, Ramos Arreguín Juan Manuel, Talavera Velázquez Dimas. (2016). "*Diseño de un Robot Neumático de 6 Grados de Libertad*". La Mecatrónica en México, Vol. 5, No. 3, páginas 92 – 103. Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. ISSN: 2448-7031.

[6] Monter Hernández Adolfo, Alegría Anaya Enrique, Ramos Arreguín Juan Manuel, Gorrostieta Hurtado Efrén, Aceves Fernández Marco Antonio. "*Robot Neumático de Seis Grados de Libertad*". Tecnificación Mecatrónica, Capítulo 12, pp. 161-168. Asociación Mexicana de Mecatrónica, AC. ISBN: 978-607-9394-20-2.

[7] Cabrera Rufino Marco Antonio, Juan Manuel Ramos Arreguín, Rivas-Araiza E.A., Efren Gorrostieta Hurtado, Jesus Carlos Pedraza Ortega. "*Sistema de monitoreo y servidor WEB con Raspberry Pi para el control de un robot neumático*". La Mecatrónica en México, Vol. 9, No. 3, páginas 171 – 184. Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. ISSN: 2448-7031.

[8] Stankovski, S., Tarjan, L., Skrinjar, D., Ostojic, G., & Senk, I. (2010). "*Using a Didactic Manipulator in Mechatronics and Industrial Engineering Courses*". IEEE Transactions on Education, 53(4), 572–579. doi:10.1109/te.2009.2036002

[9] F. Pereira, R. Lopes, R. Sarmento and C. Felgueiras. "Didactic bench to support automation learning - Industry 4.0 education". (2022). XV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference. doi: 10.1109/TAEE54169.2022.9840744.

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 41, pp. 532 – 542
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Impacto en los alumnos de ingeniería en tecnologías de automatización sobre el uso de laboratorios de entrenamiento en robótica

Rojas Sotelo Montserrat, Carreón Jaramillo Daniela Estefanía, Gómez Hernández Alejandro, Contreras Calderón María Guadalupe, Sánchez Saquín Cristian Hamilton y López Cuervo Talía Nayely

Universidad Tecnológica de Querétaro

Resumen

Este trabajo presenta la propuesta para desarrollar un laboratorio de entrenamiento en robótica tipo estación de trabajo, que permite al estudiante poner en práctica sus conocimientos, mediante la aplicación de herramientas como la programación, simulación y puesta en marcha de un robot, para que el estudiante refuerce el aprendizaje y desempeño de su conocimiento en el área de la robótica. Esto mediante la conjunción de un robot esférico de 4 grados de libertad con motores a pasos versión prototipo con conexión a un sistema de control, donde el elemento central es una Raspberry Pi 4 que tiene instalado el software RoboDK, el cual permite al estudiante con ayuda del gemelo digital del robot esférico simular los movimientos y sobre todo generar el código para programar dicho robot. Los resultados son un laboratorio de entrenamiento en robótica tipo estación de trabajo.

Palabras clave: Robótica, Laboratorio de enteramente, Simulación, Programación, Educación en línea.

1. Introducción

1.1 Delimitación del Proyecto

Una de las zonas con mayor producción a nivel industrial en México es la zona del bajío, la cual está comprendida por los estados de Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro y San Luis Potosí, de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la actividad industrial del Bajío creció 5.0%, como promedio de las variaciones anuales en el periodo 2013-2018, frente a un incremento nacional de apenas 0.6% [1]. Tan solo el estado de Querétaro de acuerdo con la consultora Aregional, en el año 2019 tuvo un crecimiento por unidad económica de 19.3 millones de pesos considerándose dentro de las 10 entidades federativas en las que el valor de la producción industrial tuvo mayor crecimiento [2]. Este crecimiento trae consigo la demanda de ingenieros altamente capacitados para la instalación y puesta en marcha de plantas y procesos. Un ejemplo de este crecimiento es la apertura del centro de investigación y desarrollo en Querétaro en software, algoritmos, pruebas y mecánica de la empresa alemana Continental [3]. Inclusive, el diario el Economista publicó en enero de 2018 que, en Querétaro la demanda de especialistas en distintas áreas de ingeniería ha crecido y seguirá creciendo por las empresas que llegan a la zona [4]. Si bien muchos procesos industriales pueden realizarse con personal humano, hoy en día las empresas están optando por la automatización de procesos.

La automatización industrial es el uso de sistemas o elementos computarizados y electromecánicos para fines industriales específicos. Como una disciplina de la ingeniería más amplia que un sistema de control, abarca la instrumentación industrial, que incluye los sensores, los transmisores de campo, los sistemas de control y supervisión, los sistemas de transmisión y recolección de datos y las aplicaciones de software en tiempo real para supervisar y controlar las operaciones de plantas o procesos industriales [5].

Uno de los campos más aplicados en la industria en modernización es el de la Robótica industrial, que puede definirse como el estudio, diseño y uso de robots para la ejecución de procesos industriales [6]. A lo largo de la historia, las transformaciones industriales ocurren cuando convergen las nuevas tecnologías con sistemas productivos antiguos. En la tercera revolución industrial se incorporaron los sistemas ciber-físicos en las actividades de logística y producción. Uno de los objetivos de la Industria 4.0 es hacer que máquinas, sistemas informáticos y equipos humanos trabajen conjuntamente en red proporcionando un elevado grado de integración, fluidez en las comunicaciones y trabajo en red de los medios de producción. El resultado de este conjunto de factores son las “fábricas inteligentes“ [7]. Los robots han demostrado a lo largo de muchos años ser una de las herramientas de la automatización más aceptadas para procesos donde se deben realizar tareas con precisión y que puede ser hasta cierto punto difíciles o peligrosas para el ser humano. Es por eso por lo que existe una gran cantidad de información para su aplicación, además de múltiples modelos y marcas de robot.

El conocimiento de la Robótica es una combinación de diversas disciplinas como son: la mecánica, la electrónica, la informática, la inteligencia artificial, la ingeniería de control y la física. Otras áreas importantes en robótica son el álgebra, los autómatas programables, la animatrónica y las máquinas de estados [8]. Siendo el manejo de la Robótica un área de especialidad muy valorada por el sector industrial y de gran importancia para la educación a nivel universitario.

En México, las Universidades Tecnológicas y Politécnicas actualmente representan una alternativa viable y de vanguardia en materia de educación superior. En el período comprendido entre 2012 y 2017, la matrícula ha crecido en 122,735 alumnos, al pasar de 221,715 estudiantes a 344,450, lo que representa un crecimiento de 58%. Hasta septiembre de 2017, la matrícula total de las Universidades Tecnológicas asciende a 246,338 alumnos, mismos que realizan estudios en 39 Programas Educativos de Técnico Superior Universitario, 27 de Ingenierías Técnicas y 39 de Licenciatura, especialmente ingenierías. Lo cual significa un incremento, con respecto a 2012, de 34%, 59% y 117%, respectivamente. Por otro lado, el total de alumnos inscritos en las Universidades Politécnicas asciende a 98,112 alumnos, mismos que realizan estudios en 53 programas de Licenciatura, especialmente ingenierías, 34 de Maestrías y 3 de Doctorados. Lo cual representa un incremento con respecto a 2012 de 18%, 55% y 200%, respectivamente [9]. Varias de estas Universidades tecnológicas cuentan con la carrera de Tecnologías de la Automatización, o Mecatrónica; la cual es una carrera de técnico superior universitario y de licenciatura en la cual los estudiantes aprenden una serie de disciplinas afines a la electrónica, la mecánica y la programación que juntas les permiten realizar la automatización y control de un proceso. Esta carrera les ha permitido a las universidades tecnológicas generar profesionales que se logran adaptar a los cambios rápidos del sector industrial.

1.2 Planteamiento del Problema

Dentro del programa educativo de la Universidad Tecnológica de Querétaro, la carrera de Ingeniería en Tecnologías de Automatización (ITA) tiene como objetivo desarrollar proyectos de automatización y control a través del diseño, administración y aplicación de nuevas tecnologías para satisfacer las necesidades del sector productivo, una de las competencias específicas que se pretende inculcar en los alumnos al cursar esta carrera, es dirigir proyectos integrados de sistemas eléctricos, mecánicos y electrónicos a través del plan de desarrollo y de conservación para su eficaz implementación en la automatización y control de sistemas [10]. Sin embargo, durante la formación del alumno, este se enfrenta a múltiples causas que truncan sus estudios, como se puede observar en la Figura 1, en la 19a generación (septiembre de 2018 - abril de 2020) de la carrera de Ingeniería en Tecnologías de Automatización el 81% de las causas globales de bajas fué por la reprobación, afectando la eficiencia terminal de la carrera [11].

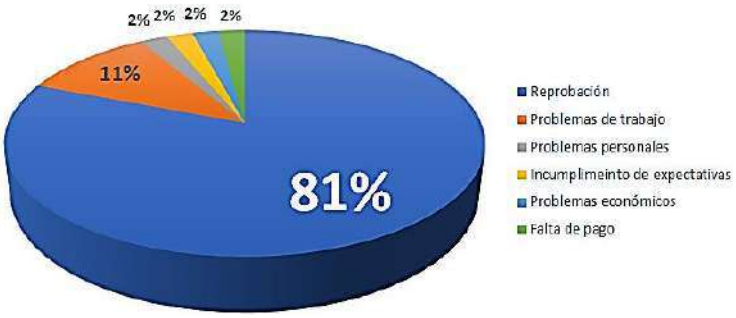


Figura 1. Causas globales de baja 19a generación de ITA (UTEQ, 2020).

En el periodo mayo – agosto 2019 los alumnos de la 19a generación cursaron el tercer cuatrimestre de la carrera de ITA obteniendo porcentajes de reprobación altos (Tabla 1). Tan solo en la materia de Optativa I (Fundamentos de Robótica Industrial) los alumnos alcanzaron un 58.3% de reprobación e inclusive esta fué la materia con el más alto índice de reprobación. Por lo tanto, esta es un área de oportunidad para incrementar la calidad educativa de la Universidad [12].

Tabla 1. Porcentaje de reprobación por asignatura [12].

Asignatura	Alumnos activos	Reprobados en ORD	Reprobados en EXTRA	Reprobados en UA	Porcentaje
Optativa I.	48	28	2	0	58.3%
Control Automático.	48	11	2	0	22.9%
Ingeniería De Proyectos.	48	7	4	0	14.6%
Sistemas Mecánicos II.	48	1	1	0	2.1%
Dirección de Equipos de Alto Rendimiento.	48	0	0	0	0.0%
Inglés VIII.	48	0	0	0	0.0%

Este proyecto presenta la propuesta para el desarrollo de un sistema robótico para el comienzo de un laboratorio utilizado en el entrenamiento de Robótica, que permite al estudiante poner en práctica sus conocimientos, mediante la programación, simulación y puesta en marcha de un robot, mejorando así su desempeño en el campo laboral.

2. Antecedentes

Los laboratorios de capacitación o entrenamiento han mostrado ser casos de éxito como son en el Instituto de Investigación y Tecnología Educativas de la Universidad Internacional de La Rioja en conjunto con la Universidad Politécnica de Valencia [13]; y también es el caso de la Universidad Militar Nueva Granada [14]. En México, el Tecnológico de Monterrey ha sido uno de los pioneros [15], a través de los laboratorios físicos y virtuales ha logrado impulsar y generar más programas educativos, además, de darles la oportunidad de impartir cursos a empresas in situ, sin la necesidad de trasladar los prototipos de enseñanza a las plantas. Si bien, en México ya el Tecnológico de Monterrey cuenta con

este esquema, su campo de acción está enfocado a las necesidades de la zona así como de las diferentes carreras de la Universidad.

Los laboratorios utilizados en el entrenamiento de Robótica se presentan como una alternativa muy interesante para la enseñanza mediante la programación, simulación y puesta en marcha de un robot, en la Universidad Tecnológica de Querétaro y sobre todo, en la zona bajío del país. En la materia de Optativa I (Fundamentos de Robótica Industrial) de la carrera de ITA los alumnos desarrollan proyectos de robótica; sin embargo, de acuerdo con una encuesta realizada a 136 alumnos (activos y egresados) que cursan o cursaron la materia en la UTEQ, aproximadamente un 40.4% de ellos (Figura 2) consideran que tienen un aprendizaje de regular a malo en este tema, lo que implica que no consideran tener las fortalezas necesarias para trabajar en el área de la Robótica.

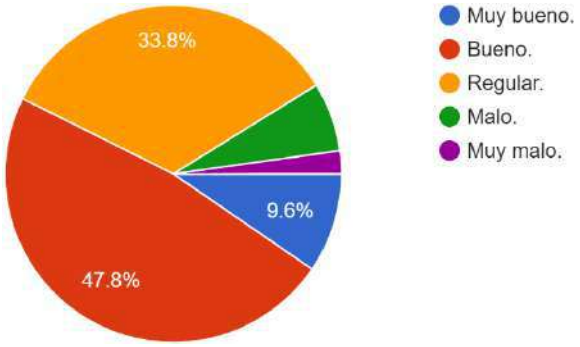


Figura 2. Gráfica de la pregunta: ¿Cómo consideras que ha sido tu aprendizaje con en el área de la Robótica durante tu estancia en la Universidad?

Cabe mencionar, que si bien el porcentaje de alumnos que consideran que tienen un aprendizaje de regular a malo fue del 40.4%, es importante recalcar que el 57.4% siente que su aprendizaje fue entre bueno y muy bueno y este es un porcentaje por debajo de lo aceptable para los estándares de calidad de la Universidad, cuando el dominio de los temas relacionados a la Robótica deberían ser considerados como de alta importancia, ya que esta área es de gran influencia a nivel industrial y se requiere de estudiantes con los conocimientos y la confianza para trabajar en estas áreas. Esta deficiencia en teoría y práctica puede representar sin duda una limitante profesional para los estudiantes una vez que se desenvuelven en el ámbito laboral, sintiéndose incapaces o poco aptos para resolver problemas más complejos y limitando su crecimiento profesional. Como se observa en la gráfica de la Figura 3 donde el 46.3% de los encuestados duda sobre sus conocimientos y su confianza para trabajar con robots en la industria.

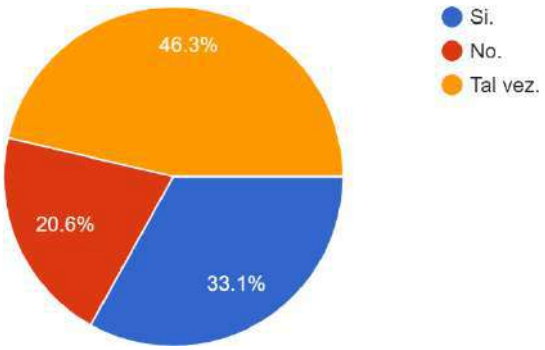


Figura 3. Gráfica de la pregunta: ¿Crees tener los suficientes conocimientos y la confianza para trabajar con robots en la industria?

Solo el 33.1% considera tener los suficientes conocimientos y la confianza para trabajar con robots en la industria. Quizás esto se debe a que la mayoría de los alumnos que cursan la materia de Optativa I no utilizan prototipos robóticos para la enseñanza de la robótica en los laboratorios de la Universidad (Figura 4).

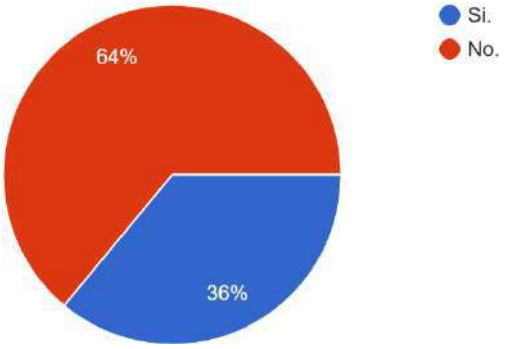


Figura 4. Gráfica de la pregunta: ¿Utilizaste algún prototipo robótico en los laboratorios de la Universidad para la enseñanza de la Robótica?

A pesar de que el 19.1% de los alumnos encuestados considera que los laboratorios de la Universidad son óptimos para el desarrollo de habilidades y conocimiento dentro de la materia de Fundamentos de Robótica Industrial. Como se observa en la gráfica de la Figura 5, la mayoría de los encuestados considera que los laboratorios de la Universidad no son óptimos para el desarrollo de habilidades y conocimiento o tal vez lo son.

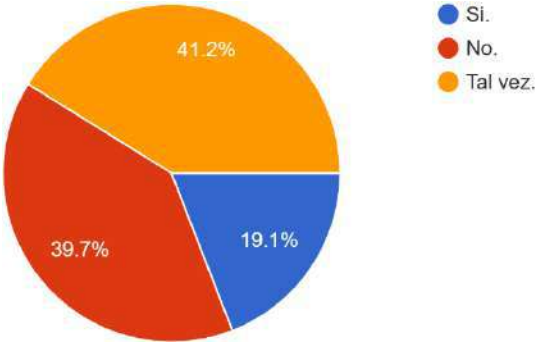


Figura 5. Gráfica de la pregunta: ¿Consideras que los laboratorios de la Universidad son óptimos para el desarrollo de habilidades y conocimiento dentro de las materias de Robótica?

Por estos motivos la mayoría de los alumnos no han implementado algún proyecto de Robótica para algún proceso (Figura 6), pese a que esta disciplina es de suma importancia para la industria actual y en crecimiento (Figura 7).

En la Figura 7 se puede observar la necesidad de brindar una buena preparación en los estudiantes de ITA durante su estancia en la Universidad, dado que un considerable número de alumnos que trabajan requieren dominar el área de la Robótica.

Por tales motivos surge la necesidad de desarrollar un laboratorio de entrenamiento en robótica tipo estación de trabajo, que permite al estudiante poner en práctica sus conocimientos, mediante la programación, simulación y puesta en marcha de un robot esférico de 4 grados de libertad para el aprendizaje y un mejor desempeño en el conocimiento de la robótica por parte del estudiante.

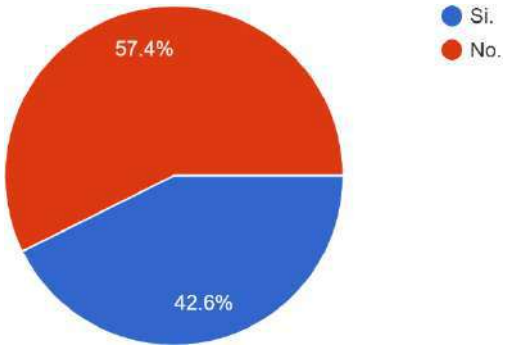


Figura 6. Gráfica de la pregunta: ¿Has implementado algún proyecto de Robótica para algún proceso?

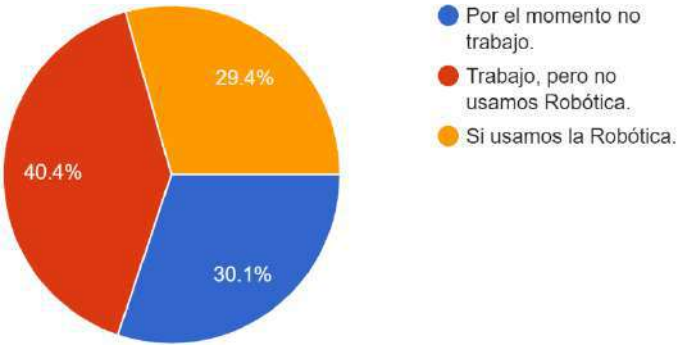


Figura 7. Gráfica de la pregunta: ¿En tu trabajo, usas la Robótica?

2.1 Justificación

Una tendencia actual a nivel mundial gracias a la industria 4.0 es la generación de laboratorios de entrenamiento, los cuales son zonas reservadas en las instituciones educativas donde se instalan equipos o prototipos para la enseñanza, pero que, los estudiantes que trabajan con ellos los manipulan en sitio o desde una computadora a través de un servicio de conexión de red local. Una idea que los alumnos tanto activos como egresados consideran útil (Figura 8) para el aprendizaje de la Robótica, pues permite simular, programar y manipular robots, así como visualizar y analizar los datos del sistema.

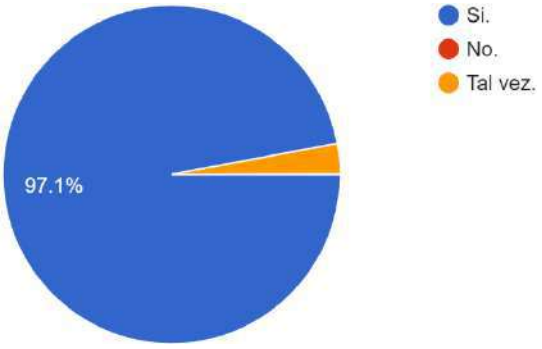


Figura 8. Gráfica de la pregunta: ¿Consideras útil tener un prototipo para el aprendizaje de la Robótica, donde tú puedas simular, programar y manipular un robot, así como visualizar y analizar los datos del sistema?

Además, los alumnos encuestados consideran que, si se renuevan los laboratorios de la Universidad con prototipos robóticos de enseñanza de la Robótica, mejorarán los conocimientos en los estudiantes, como se puede observar en la Figura 9.

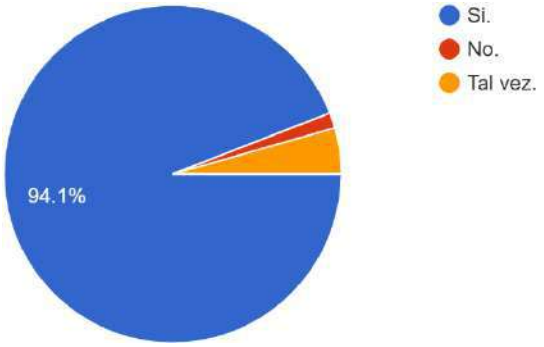


Figura 9. Gráfica de la pregunta: Si se renuevan los laboratorios de la Universidad, con prototipos robóticos de enseñanza. ¿Crees que mejorarían los conocimientos en Robótica de los estudiantes?

La mayoría de los estudiantes están de acuerdo en que es necesario que la Universidad brinde las herramientas para familiarizar a los estudiantes con ejercicios prácticos en áreas como la Robótica (Figura 10).

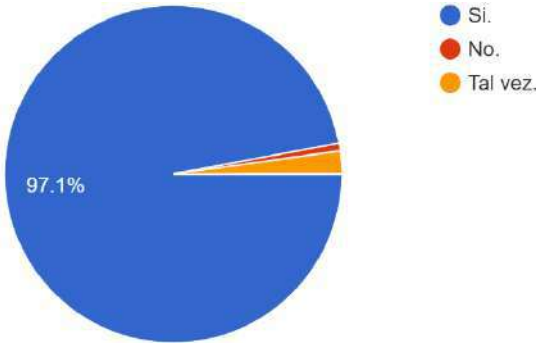


Figura 10. Gráfica de la pregunta: ¿Crees que es necesario que la Universidad brinde las herramientas para familiarizar a los estudiantes con ejercicios prácticos en áreas como la Robótica?

Por todo esto se considera que el proyecto es técnicamente factible para su realización. Y se considera como una buena idea por parte de los alumnos encuestados (Figura 11).

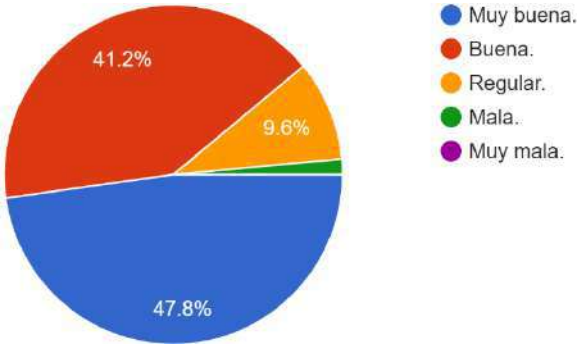


Figura 11. Gráfica de la pregunta: ¿Consideras que la idea de realizar prototipos robóticos de enseñanza es?

2.2 Hipótesis

Si se cuenta con un laboratorio de entrenamiento en robótica tipo estación de trabajo, que permite al estudiante poner en práctica sus conocimientos, mediante la programación, simulación y puesta en marcha de un robot esférico de 4 grados de libertad entonces es posible incrementar el aprendizaje y mejorar el desempeño en el conocimiento de la robótica para los estudiantes.

3. Metodología

La metodología planteada para desarrollar un laboratorio de entrenamiento en robótica tipo estación de trabajo (ver Figura 12), que permite al estudiante poner en práctica sus conocimientos, mediante la aplicación de herramientas como la programación, simulación y puesta en marcha de un robot esférico de 3 grados de libertad. Como primer paso se realiza una investigación sobre el estado del arte de proyectos similares, para su estudio y análisis para plantear una solución. Se propone una solución y se plantean los requerimientos del sistema. Se diseña los circuitos electrónicos y el mecanismo del robot para realizar las simulaciones necesarias en RoboDK. Se fabrican las piezas para ensamblar el robot e integrar la electrónica. Se somete a validación preliminar y validación finales. Finalmente se genera el manual de usuario con prácticas integradas para su realizar pruebas en la universidad.

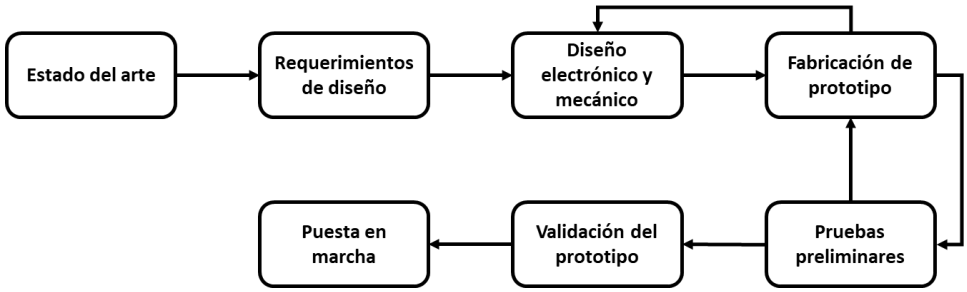


Figura 12. Diagrama de la metodología del proyecto.

4. Resultados

En la Figura 13 se muestra el diagrama de conexión actualmente instalado en el laboratorio de entrenamiento en robótica. La tarjeta utilizada es una Raspberry Pi4 que controla tres motores a pasos instalados en el robot. Dentro del diagrama de conexión está una cámara que mostrará el robot en funcionamiento en pantalla a través del envió de datos por una red de internet.

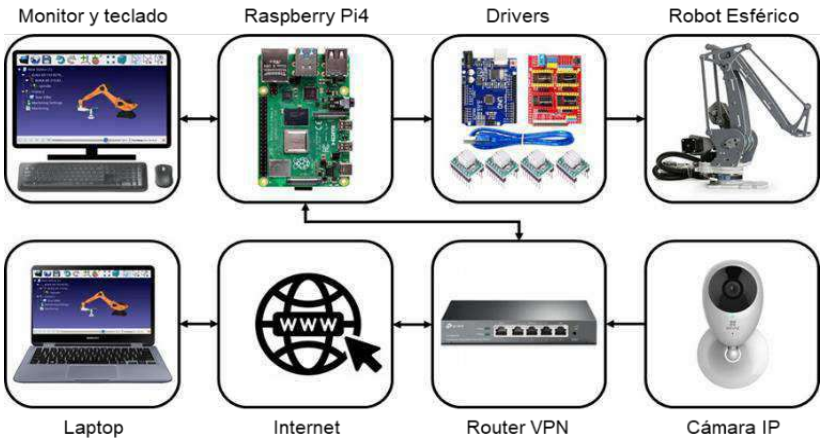


Figura 13. Diagrama de conexión para el laboratorio de entrenamiento en robótica [14][15].

El robot que se utilizará para el laboratorio es un robot esférico de 3 grados de libertad (ver Figura 14), el cual se diseñó en SolidWorks, en la Figura 15 se muestra el prototipo del robot fabricado con PLA. El robot cuenta con tres motores a pasos que controlan tres articulaciones, en las que se observa que tiene adjunta una transmisión de engranes para incrementar el toque.

Figura 14. Diseño del robot esférico de 4 grados de libertad.

Figura 14. Prototipo del robot esférico de 4 grados de libertad.

5. Discusión

Al desarrollar un laboratorio de entrenamiento en robótica tipo estación de trabajo, que permite al estudiante poner en práctica sus conocimientos, mediante la aplicación de herramientas como la programación, simulación y puesta en marcha de un robot es posible incrementar el aprendizaje y mejorar el desempeño en el conocimiento de la robótica para los estudiantes gracias a que la curva de aprendizaje se refuerza con este tipo de material didáctico y aun se puede considerar que tiene ventaja sobre otros equipos de laboratorio ya que se puede operar a distancia con ayuda de la función que le permite conectarse vía remota.

La hipótesis propuesta tiene la ventaja de ser medible, a partir de que es posible realizar una comprobación entre cuatrimestres pasados con los más recientes de las calificaciones de los estudiantes de áreas relacionadas con la robótica, sin embargo el trabajo aún no alcanza la madurez suficiente para comprobar dicha hipótesis, por lo que se seguirá trabajando hasta cumplir con los objetivos y responder las interrogantes de la investigación.

6. Conclusiones

Se han obtenido buenos resultados con relación al costo del prototipo desarrollado (Figura 14), así como de las respuestas del sistema. Se ha verificado también que el robot esférico de 3 grados de libertad no sea riesgoso para ningún usuario y que permite observar la acción del control. Sin embargo, el desarrollo del laboratorio de entrenamiento en robótica se encuentra en fase de desarrollo por lo que el trabajo por parte de los colaboradores continua y se pretende integrar más componentes para lograr el objetivo general y así contar con un dispositivo que cumpla con las expectativas de la industria 4.0 y el concepto de internet de las cosas. El trabajo futuro consiste en la digitalización del robot para realizar las primeras pruebas en el software RoboDK y hacer las pruebas necesarias con alumnos así como el desarrollo de un manual de prácticas. Además, se está trabajando con la comunicación vía internet y el diseño de una página web para visualizar en conjunto video, indicadores y controles.

Referencias

[1]. Rodrigo A. Rosales, “Bajío dinamizó la industria nacional; el sur-sureste, en el rezago” «El Economista» 11 Abril 2019. [En línea]. Available: https://www.eleconomista.com.mx/estados/Bajio-dinamizo-la- industria-nacional-el-sur-sureste-en-el-rezago-20190411-0017.html. [Último acceso: 14 Julio 2020].

[2]. Lorena Rudo, “Querétaro, líder en producción industrial” «amQuerétaro» 03 Mayo 2019. [En línea]. Available: https://amqueretaro.com/queretaro/2019/05/03/queretaro-lider-en-produccion-industrial/ [Último acceso: 14 Julio 2020].

[3]. R. Manufactura, “Continental abre en Querétaro su Centro de Investigación y Desarrollo” «Manufactura» 15 Mayo 2018. [En línea]. Available: https://manufactura.mx/industria /2018/05/15/continental-abre-en-queretaro-su-centro-de-investigacion-y-desarrollo. [Último acceso: 14 Julio 2020].

[4]. V. Estrella, “En Querétaro aumenta la demanda de especialistas” «El Economista» 30 Enero 2018. [En línea]. Available: https://www.eleconomista.com.mx/estados/En-Queretaro-aumenta-la-demanda-de- especialistas-20180130-0144.html. [Último acceso: 14 Julio 2020].

[5]. FMJ Ingenieros, “Introducción a la Automatización” «FMJ Ingenieros» 28 Febrero 2018. [En línea]. Available: https://www.fmjingenieros.com/servicios/automatizacion-industrial/introduccion-a-la- automatizacion [Último acceso: 10 Julio 2020].

[6]. European Committee for Standarization, ISO Standard 8373:1994, Manipulating Industrial Robots 1996.

[7]. M. Guerrero, “Robótica e Industria 4.0” 19 Noviembre 2018. [En línea]. Available: https:// manuelguerrerocano.com/robots-colaborativos-la-industria-4-0/ [Último acceso: 10 Julio 2020].

[8]. Real Academia Española, “Robótica” Diciembre 2017. [En línea]. Available: http://dle.rae.es/?id= WYTm4uf. [Último acceso: 8 Julio 2020].

[9]. Alejandro Granados “Creció un 58% la matrícula en universidades tecnológicas y politécnicas” «24 HORAS» 02 Enero 2018. [En línea]. Available: https://www.24-horas.mx/2018/01/02/crecio-58-la- matricula-en-universidades-tecnologicas-politecnicas/ [Último acceso: 14 Julio 2020].
[10]. UTEQ, «Ingeniería en Tecnología de la Automatización,» [En línea]. Available: http://www.uteq.edu.mx/Aspirante/Default.aspx?gI2Sr=14 [Último acceso: 15 Julio 2020].
[11]. UTEQ, «Eficiencia Terminal 19a generación» [En línea]. Available: http://lizard.uteq.edu.mx/lizard.php [Último acceso: 15 Julio 2020].
[12]. UTEQ, «Aprovechamiento Por Asignatura mayo-agosto 2019» [En línea]. Available: http://lizard.uteq.edu.mx/lizard.php [Último acceso: 15 Julio 2020].
[13]. NCYT «Un laboratorio remoto de ingeniería para estudiantes,» 5 diciembre 2017. [En línea]. Available: https://noticiasdelaciencia.com/art/26657/un-laboratorio-remoto-de-ingenieria-para-estudiantes. [Último acceso: 17 Julio 2020].
[14]. D. A. H. Carlos Fernando Ariza Ladino, «Universidad Militar Nueva Granada,» [En línea]. Available: https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/1493. [Último acceso: 17 Julio 2020].
[15]. F. S. Banda, «CONACYT,» 2 marzo 2108. [En línea]. Available: http://conacytprensa .mx/index.php/ tecnologia/tic/20341-plataformas-laboratorios-remotos-investigacion-distancia. [Último acceso: 17 Julio 2020].
[16]. Raspberry Pi. [En línea]. Available: https://www.raspberrypi.com/. [Último acceso: 1 septiembre 2023].
[17]. RoboDK. [En línea]. Available: https://robodk.com/es/. [Último acceso: 1 septiembre 2023].

Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 42, pp. 543 – 557
ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023

Prototipo de bomba de heparina para máquina de hemodiálisis

Olalde Mendoza Maximiliano, Alvarez Nieves Luis Enrique,
Soto Cajiga Jorge Alberto y Olade Mendoza Omero Nicolas
Centro de Ingenieria y Desarrollo Industrial CIDESI
m.olalde@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen

Una bomba de heparina es un dispositivo médico que se utiliza para administrar heparina de forma controlada y constante a un paciente. La heparina es un anticoagulante que se utiliza para prevenir la formación de coágulos sanguíneos, lo que puede ser importante en pacientes con ciertas afecciones médicas. El dispositivo administra la heparina en una tasa controlada y constante, lo que permite al médico ajustar la dosis de manera precisa para cada paciente. Esto es importante porque una sobredosis de heparina puede aumentar el riesgo de sangrado, mientras que una dosis insuficiente puede no ser efectiva en la prevención de coágulos. Las bombas de heparina se utilizan comúnmente en hospitales, especialmente en unidades de cuidados intensivos y en pacientes que se someten a cirugía o a tratamientos de diálisis. Su uso requiere una supervisión cuidadosa y frecuente por parte de los profesionales médicos para garantizar que el paciente reciba la dosis adecuada y para monitorear cualquier posible efecto secundario. En este trabajo se presenta un prototipo de una bomba de heparina, que sirve para validar el concepto de funcionamiento y evaluar su futuro desarrollo y aplicación en una máquina de hemodiálisis.

Palabras clave: Heparina, Bomba, anticoagulante, hemodiálisis, control

1. Introducción

La hemodiálisis es utilizada para filtrar las toxinas y el agua de la sangre, controlar la presión arterial y a equilibrar los minerales importantes en la sangre como el potasio, el sodio y el calcio. La hemodiálisis no es una cura para la insuficiencia renal, pero puede ayudar a que el paciente se sienta mejor y viva más tiempo.

La enfermedad renal crónica (ERC) ha surgido como una de las causas más prominentes de muerte y sufrimiento en el siglo XXI. Debido en parte al aumento de factores de riesgo, como la obesidad y la diabetes mellitus, el número de pacientes afectados por la ERC también ha estado en aumento, afectando a un estimado de 843.6 millones de personas en todo el mundo en 2017. Aunque la mortalidad ha disminuido en pacientes con enfermedad renal en etapa terminal (ERT), los estudios de la Carga Global de Enfermedad (GBD, por sus siglas en inglés) han demostrado que la ERC ha surgido como una de las principales causas de mortalidad en todo el mundo [1].

La máquina de hemodiálisis consta de varios subprocesos los cuales tienen tareas muy específicas, sin embargo, este trabajo se centra en el proceso de anticoagulación de la sangre durante el proceso de hemodiálisis, proceso que es controlado por una bomba de heparina.

En las técnicas de hemodiálisis (HD) es necesario prevenir la coagulación del circuito sanguíneo extracorpóreo, para lo que habitualmente se utiliza heparina. El objetivo es utilizar la dosis menor de anticoagulante con la que el dializador y la cámara venosa queden limpios de restos hemáticos. Otro objetivo es que al finalizar la sesión se pueda hacer hemostasia de los sitios de punción del acceso vascular en un tiempo prudencial.

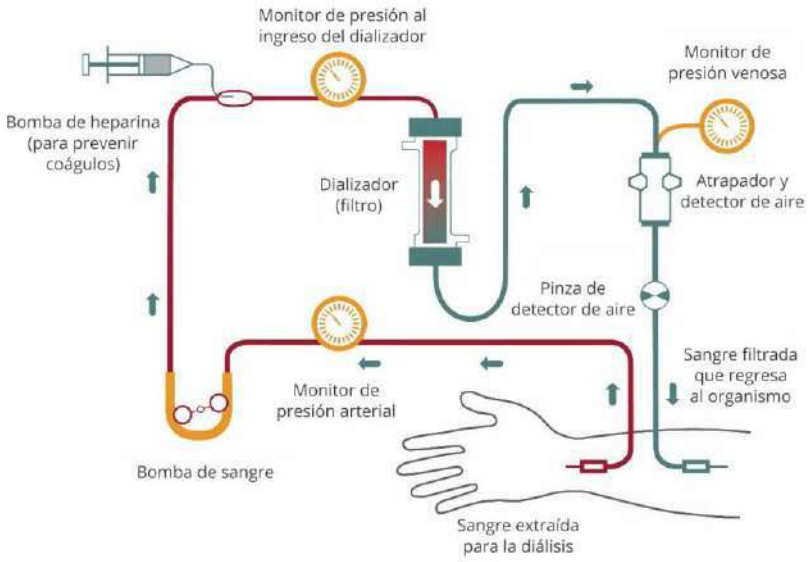


Figura 1. Circuito sanguíneo en hemodiálisis [4]

Aunque la heparina es efectiva para prevenir la formación de coágulos, su uso puede tener algunos efectos secundarios, como sangrado y complicaciones hemorrágicas. Es importante entender cómo se administra la heparina en la hemodiálisis, cuáles son las dosis adecuadas y cómo se monitorea la respuesta del paciente al tratamiento.

Para poder llevar a cabo el suministro de dicha heparina es necesario tener un control de velocidad de un motor que en este caso realizará la función de empujar el émbolo de una jeringa, que administrará dicha heparina a una velocidad establecida. Para esto se debe llevar a cabo un control de velocidad de un motor a pasos en función al perfil del flujo solicitado.

2. Principio de funcionamiento

El proceso de heparinización consta de 2 modos para administrar la heparina.

- Administración de heparina a un flujo (ml/h) durante un tiempo (Hrs: min) todo establecido por el usuario.
- Administración de un bolo de heparina (ml), que establece el usuario y este bolo se debe de administrar a un flujo constante el cual se debe establecer en la programación.

El proceso de configuración y administración de heparina puede variar dependiendo si el paciente lleva o no lleva un bolo de heparina o si el bolo es administrado manualmente, pero a continuación se considerará el procedimiento completo que el sistema debe realizar. Por otra parte, es importante mencionar acciones “extras” que el sistema tiene como se muestra en la Figura 2.

- Botón de Home: Al presionar el botón de home, el motor gira de tal manera que el carro sube, a una velocidad constante (establecida en la programación) hasta llegar al limit switch superior, el cual detiene el motor.
- Botón de Up: Mientras se mantenga presionado el botón de up, el motor gira de tal manera que el carro sube, a una velocidad constante (establecida en la programación).
- Botón de Down: Mientras se mantenga presionado el botón de down, el motor gira de tal manera que el carro baja a una velocidad constante (establecida en la programación).

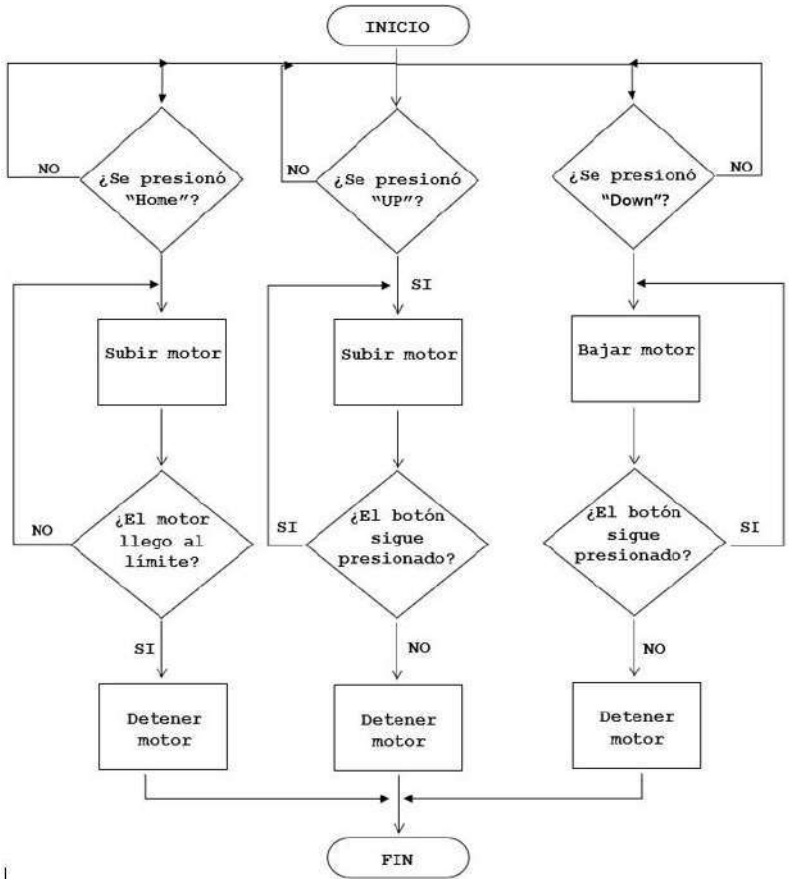


Figura 2. Diagrama de flujo de funciones extras

Por otra parte, es necesario tener presentes ciertas condiciones que se encuentran el sistema.

- Si se presiona algún limit switch, el motor se detiene automáticamente.
- Si se presiona el botón de stop, el sistema se detiene en cualquier momento.
- No se puede seleccionar 2 botones al mí mismo tiempo, además que mientras se esté administrando el bolo o el tratamiento, los demás botones no tendrán efecto en el sistema a excepción del botón de stop.
- No se podrá realizar el tratamiento si no se selecciona una jeringa, no se establece un tiempo y no se le coloca el flujo.
- El tratamiento termina hasta que se concluye el tiempo establecido o se presiona el botón de stop.

Una vez visualizadas las consideraciones anteriores, se comienza explicando cómo es el proceso de los 2 modos de administración de heparina, partiendo de que el personal ya ajusto la jeringa de tal forma que el carro ya hace contacto con el embolo de la jeringa.

En el diagrama de la Figura 3 se ilustran los pasos siguientes

1. Seleccionar una jeringa a utilizar.
2. Colocar cantidad de bolo.
3. Colocar cantidad de flujo.
4. Colocar el tiempo de infusión.
5. Se presiona el botón de *run bolus* para administrar el bolo.

6. Una vez que se haya terminado de administrar el bolo, se presiona el botón de run flujo para comenzar el tratamiento.
7. Ya finalizado el tratamiento el motor se detiene, dando por concluido el proceso.

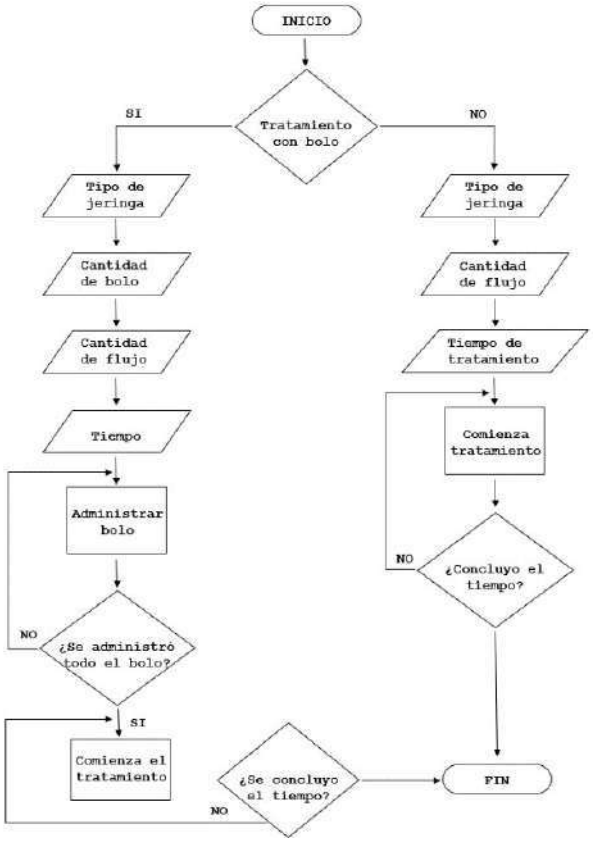


Figura 3. Diagrama de flujo, 2 modos de operación

3. Desarrollo del prototipo

Para poder llevar a cabo el desarrollo del prototipo se consideraron los siguientes requerimientos

3.1. Descripción de la problemática

Considerando que la enfermedad renal crónica es una de las enfermedades que más cuesta al sector salud y que además se espera que el mercado de la hemodiálisis crezca, entonces es deseable desarrollar una máquina de hemodiálisis con tecnología propia. Actualmente todas las maquinas utilizadas en México son de tecnología extranjera, donde los fabricantes condicionan ofrecer el servicio siempre y cuando se utilicen sus consumibles. Al tener un diseño propio además se ofrece al sector salud libertad para elegir el consumible que más convenga para los tratamientos. Para fabricar una máquina de hemodiálisis es necesario desarrollar cada subsistema que la componen y en este trabajo se presenta el desarrollo de un módulo dosificador de heparina, utilizado por la máquina para anticoagular la sangre que se extrae del paciente para su procesamiento de remoción de toxinas y/o líquidos.

En este caso se busca diseñar, programar, controlar e integrar un sistema capaz de suministrar heparina durante un tiempo y a un flujo determinado por el usuario mediante el uso de un HMI utilizando el protocolo CAN, este proceso pertenece al subsistema de heparinización.

3.2. Objetivo del prototipo

Desarrollar un sistema que emule el funcionamiento de una bomba de heparina de una máquina de hemodiálisis.

3.3. Requisitos del prototipo

Comunicación CANOPEN:

CANopen es un protocolo de alto nivel internacional y estandarizado por "CAN in Automation (CiA)" en "EN 50325-4" (CiA 301). Es creado para abarcar la capa 7 del modelo OSI referente a la aplicación. En este sentido, es una implementación en software que establece ciertos puntos clave: Específica la creación de una base para el intercambio de datos y comandos entre nodos de un CAN bus por medio de "Communication Object (COB)" Implementa mecanismos para intercambios de datos del proceso en tiempo real, transferencia de largos volúmenes de datos y envío de tramas de emergencia personalizadas. Definir las interfaces de cada Nodo o Dispositivo para poder acceder a parámetros, ya sea en modo de lectura o escritura. Al estar enfocado en una capa más alta del modelo OSI, no interfiere de ninguna manera con el funcionamiento de los controladores CAN genéricos comerciales basados en ISO-11898-1 e ISO-11898-2, al contrario, los toma como base de funcionamiento y trabaja directamente con este estándar [2].

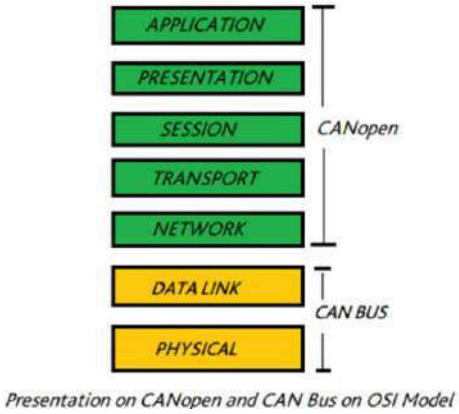


Figura 4. CAN bus [2].

Su uso está altamente aceptado para aplicaciones críticas como en el área industrial, aeronáutica y en dispositivos médicos, como las Máquinas de hemodiálisis. CANopen es mantenido y actualizado por una organización llamada CiA, que define la documentación y guías de uso del protocolo para las distintas aplicaciones. Con todo esto el protocolo se concibe como una alternativa que garantiza interoperabilidad y facilita el desarrollo de soluciones robustas y confiables.

En CANopen se utiliza la trama original del protocolo CAN básico, pero se les da una perspectiva diferente a los campos recibidos COB-ID: Este es el campo habitual de Message ID, sin embargo, se hace una distinción de los primeros 4 bits con los siguientes 7, ya que aquí se agrega un concepto llamado "function Code" para los primeros 4 y para los 7 bits siguientes es el "Node ID" [3].

Driver motor a pasos:

El STSPIN820 es un controlador diseñado específicamente para motores a pasos. Proporciona una interfaz fácil de usar para controlar motores a pasos y ofrece una amplia gama de características para facilitar su implementación.

- Incluye un microcontrolador integrado que se utiliza para controlar y gestionar las operaciones del motor. Esto permite una mayor flexibilidad en la configuración y control del motor.

Generalmente incluye una interfaz de comunicación que puede ser utilizada para conectar el controlador a un microcontrolador o una unidad de procesamiento central. Esto permite la comunicación entre el microcontrolador principal y el controlador de motor.

- El controlador STSPIN820 está equipado con características de protección y seguridad para proteger tanto el controlador como el motor. Estas características pueden incluir protección contra sobre corriente, sobretensión y protección térmica.
- Modos de operación: El controlador STSPIN820 admite varios modos de operación, como medio paso, paso completo y otros modos que permiten controlar la velocidad y la dirección del motor.
- Alimentación y eficiencia energética: El controlador STSPIN820 admite una amplia gama de voltajes de alimentación, lo que lo hace adecuado para una variedad de aplicaciones. También se esfuerza por ser eficiente en términos de consumo de energía.
- Documentación y soporte técnico: STMicroelectronics proporciona documentación detallada, como hojas de datos, manuales de usuario y ejemplos de código, para ayudar a los diseñadores a utilizar el STSPIN820 en sus aplicaciones.

Figura 5. Estructura CAN

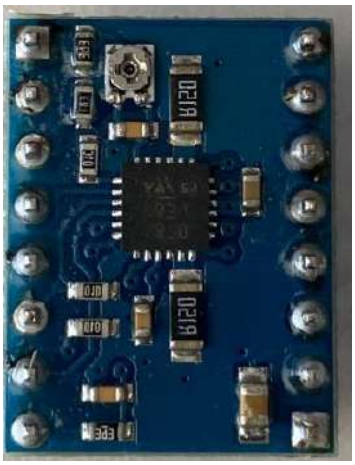


Figura 6. EVALSP820

Tiva C TM4C123GH6PM7:

Una Tiva C TM4C123GH6PM7 es un microcontrolador de 32 bits fabricado por Texas Instruments.

- Arquitectura ARM Cortex-M4 de 32 bits con una frecuencia de reloj de hasta 80 MHz.
- Memoria flash de 256 KB y SRAM de 32 KB.

- Módulo de Hibernación con respaldo de batería
- USB 2.0 (OTG/Anfitrión/Dispositivo)
- 8 UART con soporte para IrDA, 9 bits e ISO7816
- 6 I2C
- 4 interfaces seriales SPI, Microwire o sincrónicas de TI
- 2 CAN
- Soporte para comunicación inalámbrica con Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee y otros protocolos.
- Integración de un acelerómetro de tres ejes y un sensor de temperatura.
- Diseñado para operar en un rango de temperatura de -40°C a 105°C.
- Bajo consumo de energía con modos de ahorro de energía integrados.
- Compatible con una amplia gama de herramientas de desarrollo y software, incluyendo la suite de software gratuito TI-RTOS y el kit de desarrollo de software Code Composer Studio (CCS)

Interfaz del IDE de Code Composer estudio:

Code Composer Studio (CCS) es un entorno de desarrollo integrado (IDE) desarrollado por Texas Instruments (TI) para la programación y depuración de microcontroladores y procesadores digitales de señales (DSP) de la empresa. Este IDE se utiliza en aplicaciones de sistemas embebidos y se centra en facilitar el desarrollo de software para los dispositivos de TI.

Interfaz de LabView

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un entorno de desarrollo de software y un sistema de diseño de sistemas de prueba, control y adquisición de datos. Fue desarrollado por National Instruments y se utiliza en aplicaciones de ingeniería, investigación, automatización y control.

3.4. Desmontaje de componentes

Se parte de un módulo de heparina de una máquina de hemodiálisis, del cual se desmonto el motor junto con su mecanismo (como se puede observar en la Figura 7), que se analizó para realizar ingeniería inversa.

Figura 7. Estructura de mecanismo y motor a pasos

3.5. Diseño CAD de piezas faltantes y carcasa

Posteriormente se realizó un diseño CAD de algunas piezas necesarias para poder emular el proceso heparinización, así como una carcasa que permite sujetar la jeringa y a su vez empujar el émbolo (como se puede observar en la Figura 8), ya que la que se tenía en la máquina de hemodiálisis era inoperable.

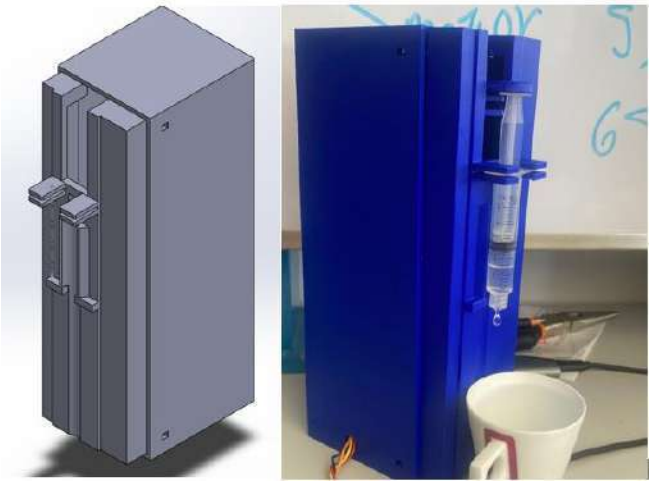


Figura 8. Carcasa de bomba de heparina.

3.6. Diseño electrónico

En la Figura 9, se muestra el diseño del esquemático de los componentes que intervienen en la bomba de heparina, así como sus conexiones necesarias para su funcionamiento.

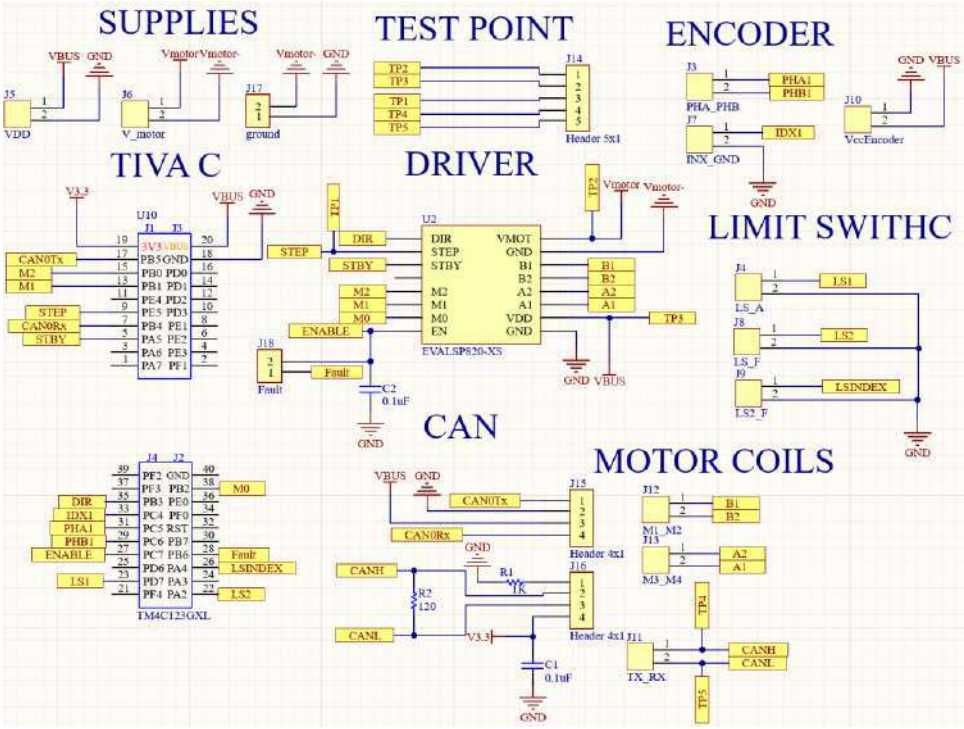


Figura 9. Diagrama de conexiones

Una vez que se tiene el esquemático de los componentes, se continuó con la elaboración del diseño de la PCB.

En la Figura 10 se puede observar cómo se verían los componentes montados sobre la placa, posterior a esto se comenzó con la fabricación de la PCB, así como sus pruebas de validación

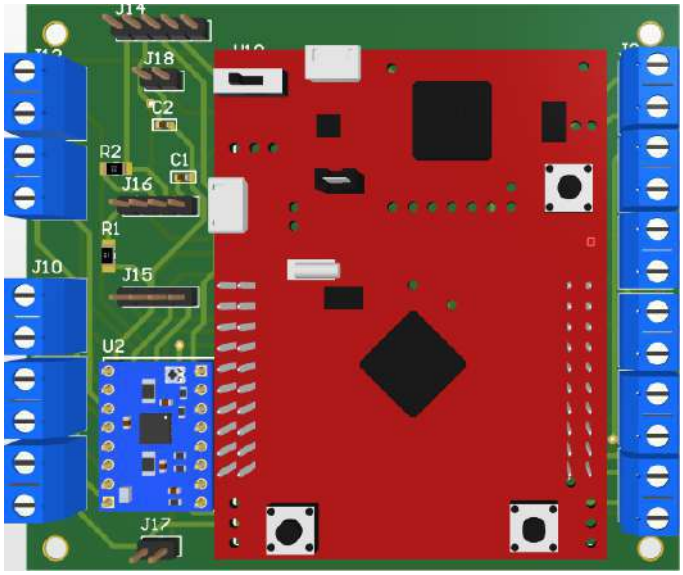


Figura 10. PCB bomba de heparina

3.7. Construcción del prototipo

Una vez que se tiene el diseño de la PCB se comenzó con su fabricación. Como se puede observar en la Figura 11, donde ya se encuentran montados todos los componentes sobre la PCB como se mostraba en la Figura 10. Posteriormente se validó la tarjeta, para ello se leyeron y/o se controlaron todos los periféricos.

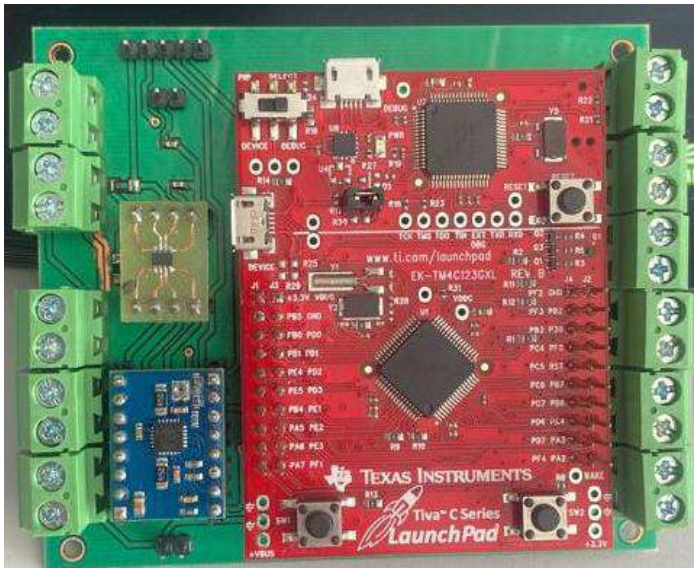


Figura 11. Componentes montados en PCB

3.8. Caracterización del motor

Una vez completado el prototipo, se comenzó a caracterizar el motor, ya que se busca tener una relación de ml administrados por tiempo entre pasos, para ello se realizó un algoritmo para poder muestrear los datos deseados.

En la tabla 1 se muestra los mililitros administrados durante un determinado tiempo entre paso y paso.

Tabla 1. Datos de caracterización

Tiempo de ejecucion (min)	Delay ms	Muestra	Promedio
1	10	4.1	4.1
1	10	4.1	
1	10	4.1	
1	20	2	2
1	20	2	
1	20	2	
1	30	1.4	1.37
1	30	1.4	
1	30	1.3	
1	40	1	1
1	40	1	
1	40	1	
1	50	0.8	0.8
1	50	0.8	
1	50	0.8	
1	60	0.7	0.67
1	60	0.6	
1	60	0.7	
1	70	0.5	0.57
1	70	0.6	
1	70	0.6	
1	80	0.5	0.53
1	80	0.6	
1	80	0.5	
1	90	0.4	0.4
1	90	0.4	
1	90	0.4	
1	100	0.4	0.39
1	100	0.3	
1	100	0.4	
1	110	0.38	0.38
1	110	0.38	
1	110	0.38	
1	120	0.34	0.35
1	120	0.35	
1	120	0.35	

Para la elaboración de la tabla 1 se necesito variar el tiempo entre pasos cada 3 muestras, para esto fue necesario poner al trabajar el sistema durante 1 min (1 minuto por muestra) y cada 3 muestras la variable “Delay ms” iba incrementando de 10 en 10 ms, después se obtuvo un promedio de las 3 muestras.

Posteriormente se graficaron los datos de la tabla 1 como se puede observar en la Figura 12.

3.9. Proceso de heparinización

El módulo de heparinización consta de varios periféricos los cuales se deben considerar en la programación y además considerar que estos datos serán proporcionados desde una interfaz gráfica mediante el protocolo CAN.

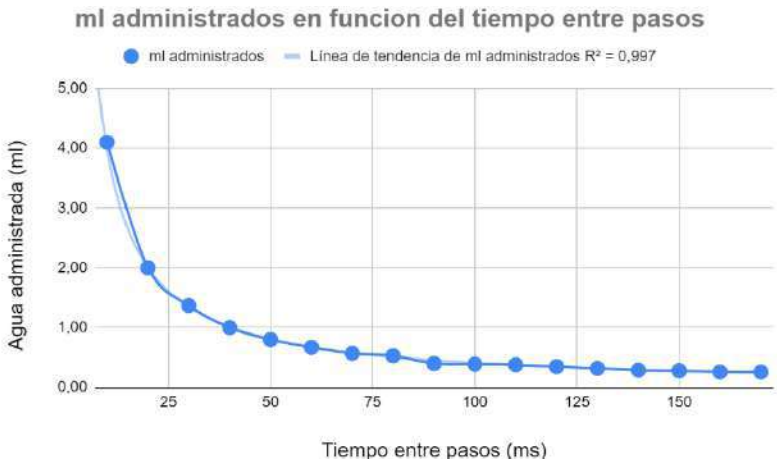


Figura 12. Comportamiento del sistema

Los periféricos son los siguientes:

- Un botón para subir el motor
- Un botón para bajar el motor
- Un botón para ir a home
- Un botón para administrar la heparina (rutina 1)
- Un botón para administrar el bolo (rutina 2)
- Un botón para seleccionar la jeringa a utilizar
- Un botón de stop

La bomba de heparina consta de 2 rutinas o 2 formas de administrar automáticamente la heparina:

- Administrar un flujo de heparina durante un tiempo (tratamiento)
- Administrar una cantidad de heparina a un flujo constante (bolo)

Además, cuenta con otros procesos los cuales sirven para poder manipular el motor y así ajustar la jeringa una vez montada.

- Subir el motor
- Bajar el motor
- Mandar el motor a home
- A grandes rasgos el proceso es el siguiente:
- Si se presiona el botón de home, el motor deberá severa subir el carro hasta que llegue al limit switch 1.
- Mientras se mantenga presionado el botón de bajar, el carro deberá estar bajando, interrumpiendo su funcionamiento si llega al fin de la carrera.
- Mientras se mantenga presionado el botón de subir, el carro deberá estar subiendo, interrumpiendo su funcionamiento si llega al fin de la carrera.

Para poder realizar la rutina 1 se requieren 3 parámetros:
- Tiempo de tratamiento (H.MIN)
- Flujo (ml/h)
- Tipo de jeringa

Una vez teniendo los parámetros, si el botón de run es presionado se comenzará con su administración y se detendrá una vez concluido el tiempo establecido o si llega a un límite de carrera o si se presiona el botón de stop. Para poder realizar la rutina 2 se requieren 2 parámetros:

- Cantidad de heparina (ml)
- Tipo de jeringa

3.10. CANopen

Una vez que se comprueba el funcionamiento del sistema, se procede a realizar la comunicación can, para lo que se utiliza otro microcontrolador Tiva C, la cual se configura como maestro para recibir los datos necesarios de la interfaz hombre máquina y enviarlos al microcontrolador de control de heparina, para esto es necesario dar de alta las variables en el diccionario de objetos y acomodarlos en cada PDO (Process data objects), en otras palabras, se debe acomodar las variables en cada objeto de datos como se puede observar en la Figura 13, la cual contine las variables necesarias para controlar el subsistema.

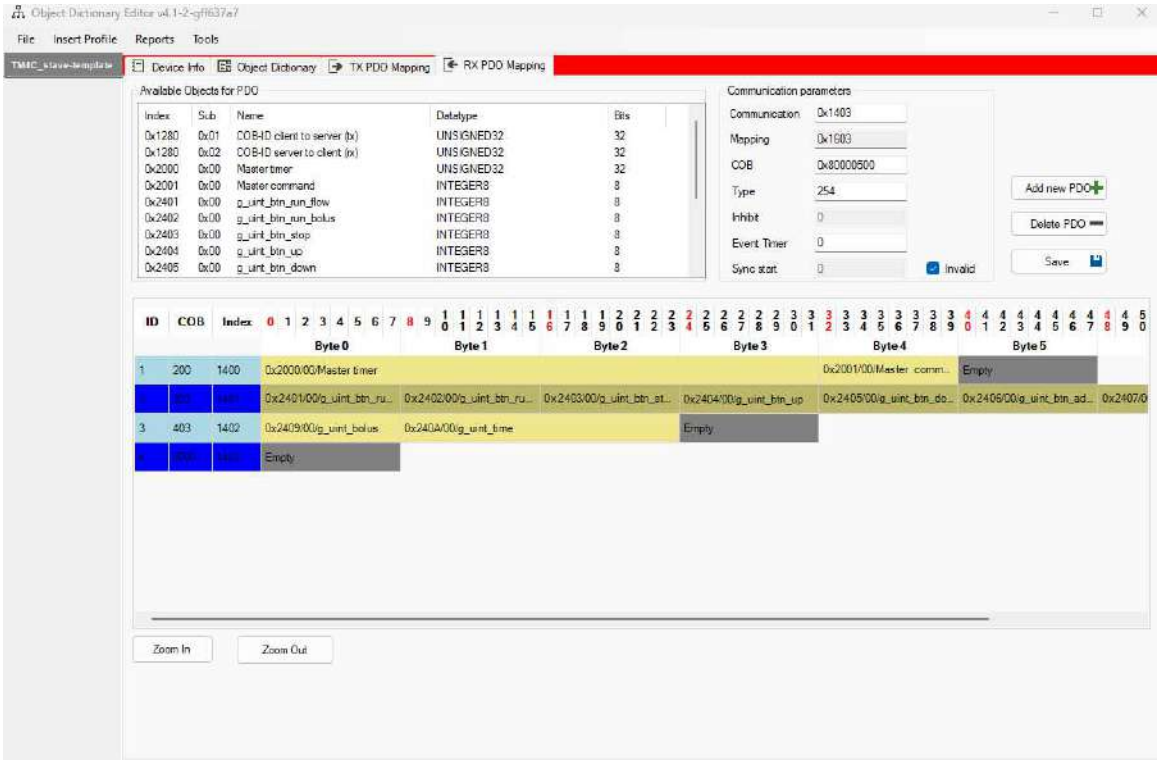


Figura 13. Diccionario de objetos CAN

Para que el usuario pueda realizar la configuración y el control de la bomba de heparina es necesario contar con los siguientes periféricos:

- Un Botón de inicio de administración de heparina durante el tratamiento
- Un Botón de inicio para administrar bolo
- Un Selector de jeringa a utilizar
- Un botón de selección de jeringa
- Un botón de selección de tiempo
- Un botón de Home
- Un botón de stop
- Un botón para bajar el carro
- Un botón para subir el carro
- Un control numérico para colocar el bolo (ml)
- Un control numérico para colocar el flujo (ml/h)
- Un control numérico para colocar el tiempo de infusión (h: min)

- Un indicador de heparina administrada

En la Figura 14 se muestran las conexiones maestro – esclavo. La Tiva que se encuentra montada sobre la PCB es el esclavo, ya que es la encargada de controlar el subsistema, y la otra Tiva es el maestro la cual únicamente iría conectada a la computadora y a los pines del CAN, ésta únicamente manda instrucciones al esclavo, estas instrucciones se generan por medio de la interfaz gráfica, la cual contiene todos los botones previamente comentados, como se pude observar en la Figura 15.

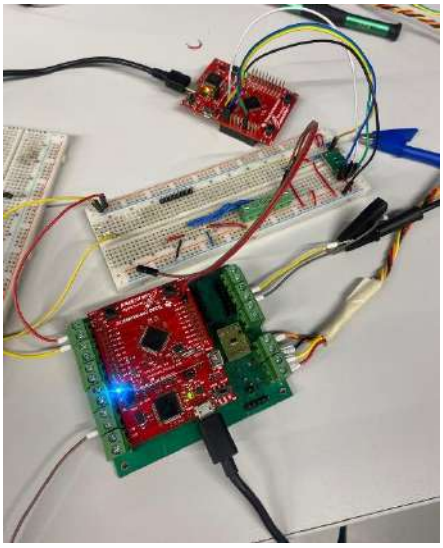


Figura 14. Conexiones maestro esclavo

Figura 15. Interfaz grafica

4. Resultados

Una vez que se finalizó con el desarrollo del prototipo se comenzó con la validación de éste. Para ello se simularon diversos tratamientos y se compararon los mililitros ingresados por el usuario y los mililitros administrados, posteriormente se almacenaron estos datos en una tabla de Excel, como se observa en la tabla 2, para posteriormente analizar los resultados obtenidos.

Tabla 2 Tabla de resultados

Tiempo de ejecucion (min)	Delay ms	ml administrados	ml deseados	Diferencia (ml)	Error (%)	Error relativo (ml)
1	10	4.1	4.1	0	0.00	0.000
1	20	2	2	0	0.00	0.000
1	30	1.37	1.4	0.03	2.14	0.021
1	40	1	1	0	0.00	0.000
1	50	0.8	0.8	0	0.00	0.000
1	60	0.67	0.7	0.03	4.29	0.043
1	70	0.57	0.6	0.03	5.00	0.050
1	80	0.53	0.5	-0.03	6.00	0.060
1	90	0.4	0.4	0	0.00	0.000
1	100	0.39	0.39	0	0.00	0.000
1	110	0.38	0.38	0	0.00	0.000
1	120	0.35	0.36	0.01	2.78	0.028
1	130	0.32	0.34	0.02	5.88	0.059
1	140	0.29	0.3	0.01	3.33	0.033
1	150	0.28	0.29	0.01	3.45	0.034
1	160	0.26	0.26	0	0.00	0.000
1	170	0.26	0.25	-0.01	4.00	0.040
Erro promedio					2.17	0.022

En la Figura 16 se puede observar la gráfica de la tabla 2, en la cual se realiza una comparativa entre los ml administrados y los ml deseados por el usuario, y así poder observar que tanto error tiene el subsistema.

Figura 16. Comportamiento ideal vs comportamiento real

Como se puede observar en la tabla 2, conforme el tiempo entre pasos aumenta, los mililitros administrados disminuyen, teniendo un error promedio de 2.17% equivalente a 0.022 ml.

Por otra parte, en la Figura 16 se puede observar cómo es el comportamiento de la bomba, mostrando la poca diferencia que hay entre el valor deseado y el medido, concluyendo que el muestreo de datos se realiza de forma correcta.

5. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos durante la experimentación se puede llegar a la conclusión que el prototipo realiza la administración de la heparina (en este caso se realizó con agua) de forma

correcta teniendo un error de 0.022 mil, administrando aproximadamente la heparina solicitada como se puede observar en la Figura 16, considerando las limitantes de que solo es una prueba de concepto.

En este trabajo se presentó un prototipo, como prueba de concepto, de una bomba para dosificar heparina, enfocado a ser utilizado en una máquina de hemodiálisis. Se validó que la electrónica, el control y la interfaz son viables para continuar con su desarrollo e iniciar su integración en un sistema del circuito sanguíneo. Como trabajo futuro se procederá a integrar este concepto en un sistema, el cual considera, entre otras cosas, la normativa aplicable para el desarrollo, la cual enfoca el diseño para que sea fiable y seguro, condiciones indispensables en el desarrollo de dispositivos médicos.

6. Agradecimientos

Este trabajo fue soportado por el proyecto de CONAHCYT No. 322623 denominado Laboratorio Nacional de Investigación y Tecnologías Médicas, LANITEM, apoyado a través del programa presupuestario F003.

7. Referencias

[1] Kovesdy, C. P. (2022). Epidemiology of chronic kidney disease: an update 2022. *Kidney International Supplements*, *12*(1), 7–11. https://doi.org/10.1016/j.kisu.2021.11.003

[2] Gedenk, T. (2016, octubre 7). CANopen routing (multi-level-networking in CANopen netzen). Embedded Communication. https://www.embedded-communication.com/en/canopen/canopen-routing-multi-level-networking/

[3] Influx Technology. (2021, agosto 26). What is CANopen? Influx Technology. https://www.influxtechnology.com/post/what-is-canopen

[4]Técnicas de Hemodiálisis. (2022, julio 13). Hemodiálisis Fuentes Ecatepec. https://hemodialisisfuentesecatepec.com/tecnicas-de-hemodialisis/

Kaizen y 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 por internet,
formato: PDF, tiraje: 1000, pp. 560, Tamaño: 20 Mb.

ISBN: 978-607-9394-28-8

9 786079 394288

"MEDIANTE EL CONOCIMIENTO SEMBRAMOS EL FUTURO"
ASOCIACIÓN MEXICANA DE MECATRÓNICA A.C.