INGENIO DEL QUEHACER MECATRÓNICO

Salazar S. Ramos J.M.
Cabal E. Vargas J.E.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico

1ª Edición

Salazar Colores Sebastián
Ramos Arreguín Juan Manuel
Cabal Yépez Eduardo
y Vargas Soto José Emilio

“Ingenio del Quehacer Mecatrónico”

Salazar Colores Sebastián
Ramos Arreguín Juan Manuel
Cabal Yépez Eduardo
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, 08 de mayo, 2023.

ISBN: 978-607-9394-27-1

Derechos reservados.
Esta obra es propiedad intelectual de sus autores y los derechos de publicación han sido legalmente transferidos a la editorial. Las opiniones y la información que se muestran en los capítulos del libro son responsabilidad única y exclusivamente de los autores 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

Ingenio del Quehacer Mecatrónico
ISBN: 978-607-9394-27-1, México, 2023

ÍNDICE

Capítulo 1 1
Caracterización óptica de la reflectancia difusa de la piel utilizando el algoritmo PSO
Cantú Rodríguez José Mario, Puente Ramírez Norma Patricia, Torres Treviño Luis Martín y Rico Mendez Mario Angel.

Capítulo 2 18
Diseño y construcción de un prototipo médico de electroterapia y presión negativa con fines demostrativos
Gaona Adame Eder Antonio, Peñaloza Mendoza Guillermo Rey y Castro Zenil Mario Salvador.

Capítulo 3 32
Prototipo de pierna de robot basada en el mecanismo Evans 2
Alcacio Prieto Israel, Núñez Altamirano Diego Alfredo, Monreal Carbajal Carlos Jesús E., Torres del Carmen Felipe J. y Ramírez Paredes Juan P.

Capítulo 4 45
Diseño de una abonadora agrícola para el cultivo de caña de azúcar mediante software de CAD
Palacios Cortés Ricardo, Flores Montiel Marlem y Vázquez Díaz Jose Juan.

Capítulo 5 62
Software académico que registra la medición de cuatro sensores MPU6050
Candia García Filiberto, Benítez Cruz Gerardo Alan, Ambrosio Lázaro Roberto Carlos, Flores Méndez Javier y González Contreras Irving

Capítulo 6 74
Sistema mecatrónico auxiliar en el tratamiento del trastorno por déficit de atención/hiperactividad mediante neurofeedback
Pérez Martínez Tania Jareth, Jiménez Garibay Alonso Alejandro y Palacios Campos José Guadalupe Uriel.

Capítulo 7 86
Sistema mecatrónico para el proceso de inoculación automatizado en medios de cultivo
Peñaloza Mendoza Guillermo Rey, Flores Medina Pablo Jonatán y Garibay Murillo Paola.

ISBN: 978-607-9394-27-1, México, 2023

ÍNDICE

Capítulo 8 — 95
Plataforma didáctica reconfigurable con Rapsberry Pi 3b+
Maganda Carvajal Jaime Alberto, Pérez Orozco Juan Adrián, Beltrán Medina Paulina Karely, Reyes de la torre Angel, Saguilan Guerra José Manuel, Horta Martínez Daniel Emiliano, Ramírez Rangel Noel Servando y Rico Bravo Juan Carlos.

Capítulo 9 — 109
Estación meteorológica reconfigurable con Arduino Uno
Reyes de la Torre Ángel, Saguilan Guerra José Manuel, Horta Martínez Daniel Emiliano, Ramírez Rangel Noel Servando, Rico Bravo Juan Carlos, Maganda Carvajal Jaime Alberto, Beltrán Medina Paulina Karely y Pérez Orozco Juan Adrián.

Capítulo 10 — 123
Diseño mecatrónico de un robot hexápodo explorador
Lugo Lugo Diego Roberto, Navarro Ríos Martin, Ramírez Rangel Noel Servando, Maganda Carvajal Jaime Alberto y Pérez Orozco Juan Adrián.

Capítulo 11 — 136
Desarrollo de un sistema de medición para la velocidad del proyectil en una barra de Hopkinson
Zavala Villalpando José Guadalupe, Sámano Ortega Víctor Manuel, Aguilera Álvarez Juan Pablo, Martínez Nolasco Juan José y Alcaraz Caracheo Luis Alejandro.

Capítulo 12 — 154
Implementación de un sistema difuso tipo Sugeno para estimar la dificultad en sopas de letras
González Gómez Yasarit Erasmo, Martínez Reyes Magally, Serrano Pérez Edgar y Soberanes Martín Anabelem.

Capítulo 13 — 166
Sistema de Control de Equipos de Laboratorio (SCEL)
Mirelez Delgado Flabio Dario, Hernández González Umanel Azazael, López Serrano Irma Yvette, Cruz Leija Roberto Oswaldo, Mena Zamora Jazmín Abigail y Muñoz Moreno Fátima del Rosario.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico
ISBN: 978-607-9394-27-1, México, 2023

ÍNDICE

Capítulo 14 178
Modelo de orden reducido (ROM) en un motor de inducción magnética
Ibáñez Olvera Mario, Balderas Gutiérrez Juan Nabor, Jaramillo Sierra Bethsabet y González Pulido Axel.

Capítulo 15 191
Diseño de un transformador de potencia por medio de simulación numérica
Ibañez Olvera Mario, Jaramillo Sierra Bethsabet, Balderas Gutiérrez Juan Nabor y Bobadilla López Angel.

Capítulo 16 203
Construcción e instrumentación de un robot cartesiano mediante una interfaz entre Matlab y FPGA
Gonzalez Villagomez Esau, Gonzalez Villagomez Jacob, Rodriguez Donate Carlos y Calderon-Uribe Uriel.

Capítulo 17 214
Procedimiento para el diseño de un sensor lineal para diversas aplicaciones
Ibañez Olvera Mario, Jaramillo Sierra Bethsabet, Yañez Badillo Hugo y Pérez Carbajal José Adrian.

Capítulo 18 223
Diseño de un guardarropa automático para uso residencial
Mirelez Delgado Flabio Darío, Hernández González Umanel Azazael, Moreno Báez Miguel Ángel, Cruz Leija Roberto Oswaldo, Carranza Perales Andrea del Carmen y Ramírez Sánchez Kassandra.

Capítulo 19 235
Diseño de colmena automatizada con implementación de sistema de comunicación para monitoreo y control del proceso de recolección de miel
Hernández González Umanel Azazael, Cardona Candelas José Isaac, Matías García Daniel Mauricio, Ortiz Valdez Jorge Alberto, Villa Guerrero Juan Antonio, Delgado Pamanes Miguel Fernando y Mirelez Delgado Flabio Dario.

ÍNDICE

Capítulo 20 254
Diseño e Implementación de un Sistema de Fertirrigación para Cultivos Aeropónicos
Moreno Aguilera Cristal Yoselin, Martínez Nolasco Coral y Martínez Nolasco Juan José.

Capítulo 21 266
Diseño y Desarrollo de una Pulsera Inteligente para el Cuidado de la Salud
Simental Martinez Omar Alejandro, Guerrero Osuna Héctor Alonso, Ornelas Vargas Gerardo, Luis Fernando Luque Vega y Antonio del Rio de Santiago.

Capítulo 22 275
Red Neuronal Artificial Basada en Mapas Auto-organizados para el Posicionamiento de Robots
Paula Rosalía Flores Arce, Erick Rodríguez Hernández, Carlos Ríos Ramírez y Yesenia Eleonor González Navarro.

Capítulo 23 289
Propuesta de metodología para la programación de un vehículo aéreo no tripulado
Ramos Juárez Enrique Iván, Ramos Arreguín Juan Manuel, Pedraza Ortega Jesús Carlos, Aceves Fernández Marco Antonio, Avendaño Juárez José Luis y Gorrostieta Hurtado Efrén.

Capítulo 24 302
Desarrollo y construcción de órtesis funcional para la rehabilitación del síndrome del túnel carpiano
Reveles Martínez Rafael, Omar Désiga Orenday, Betancourt Ramírez Bryan, Márquez Carlos Luis Antonio y Medina Haro Marco Antonio.

Capítulo 25 312
Simulación de una plataforma robótica móvil en ROS mediante el simulador Gazebo
Arroyo Romero José Ángel, González Barbosa José Joel, Ruiz Torres Maximiano Francisco, Sandoval Castro Xochitl Yamile y Francisco Javier Ornelas Rodríguez.

ISBN: 978-607-9394-27-1, México, 2023

ÍNDICE

Capítulo 26 *331*

Diseño Mecánico y Control de Movimiento de un Sistema Robótico para Grabado de Joyería

Galván Pérez Daniel, Beltrán Carbajal Francisco, Velázquez Contreras Jesús Benjamín, Albarrán Maldonado Alma Luz, Rivas Cambero Iván de Jesús y Gayou Hernández Emmanuel.

Capítulo 27 *350*

Implementación de un Sistema SLAM Multi-Agente para 2 Robots Humanoides Tipo DARwIn-OP 1

Rangel Martínez Miguel Fernando, García Robles Víctor Daniel, Cortez Vega Ricardo Alan y González Navarro Yesenia Eleonor.

Capítulo 28 *366*

Diseño y construcción de un prototipo a escala de un robot móvil autónomo

Reveles Martínez Rafael, Domínguez Sánchez Sergio, Flores Pinedo Rafael,Dávila Martin del Campo Jesús, Alcalde Navarro Julio, Celaya Padilla José María y Luna García Huizilopoztli.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 1, pp. 1 – 17
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Caracterización óptica de la reflectancia difusa de la piel utilizando el algoritmo PSO

Cantú Rodríguez José Mario[1], Puente Ramírez Norma Patricia[1], Torres Treviño Luis Martín[1], Rico Méndez Mario Angel[2]

[1]Posgrado en Ingeniería Eléctrica, FIME, UANL
[2]Posgrado en Ingeniería Física, FCFM, UANL
jose.canturr@uanl.edu.mx

Resumen

Se propone una metodología para extraer numéricamente características ópticas de las capas de la piel humana (principalmente de las capas epidermis y dermis) analizando la reflectancia difusa de la misma. Entre las características que se buscan son: el porcentaje de melanina, de sangre, de agua, la saturación de oxígeno (parámetros relacionados con el coeficiente de absorción), el coeficiente de esparcimiento y los espesores de las capas de la epidermis y dermis. Los valores numéricos de estos parámetros son importantes para establecer el estado de la piel, muchas enfermedades cambian el valor de estos parámetros. En su totalidad se caracterizaron 11 parámetros en este trabajo, los cuales conforman un modelo de 3 capas de la piel. La metodología propuesta consta de un algoritmo de inteligencia colectiva PSO y el método Montecarlo para la propagación de la radiación electromagnética en forma de fotones. Para las pruebas realizadas se utilizaron 6 espectros de reflectancia difusa experimental de 6 voluntarios obtenidas mediante un espectrofotómetro. Para encontrar los 11 parámetros de la piel, el PSO, en conjunto con el Método Montecarlo, calcula el mejor conjunto de parámetros de la piel que minimice el error absoluto entre la reflectancia difusa experimental y la reflectancia difusa generada por simulaciones del Método Montecarlo.

Palabras clave: Melanina, Sangre, Agua, Piel, Esparcimiento, Absorción, Método Montecarlo, PSO, Reflectancia difusa.

1. Introducción

La piel es el órgano más grande del cuerpo humano, rodea todo el cuerpo protegiéndolo del exterior, y efectúa diferentes funciones vitales para mantener el cuerpo en un estado saludable. Al estar en el exterior, la piel se ha convertido en la medicina como un primer indicador de enfermedades tales como deshidratación, anemia o trastornos de pigmentación [1][2]. Motivo por el cual se han efectuado estudios acerca de las características, propiedades y estructura de este órgano. Debido a la estructura interna de la piel y de las sustancias que la conforman, cuando la radiación electromagnética entra en contacto con la piel surgen varios fenómenos ópticos: absorción, esparcimiento, transmisión y reflexión [3]. El estudio de estos fenómenos ha ayudado a generar una caracterización óptica de la piel humana. Principalmente en el análisis de la reflectancia difusa de la piel [4]. Una técnica que se utiliza para simular la propagación de la radiación electromagnética en la piel es el Método Montecarlo, con este método se puede estimar la reflectancia difusa de la piel en base a un modelo de capas establecido [5]. La caracterización de la piel humana mediante el análisis de la reflectancia difusa se ha abordado mediante diferentes métodos, desde métodos clásicos iterativos hasta métodos de machine learning y redes neuronales artificiales.

Un primer antecedente corresponde a Zonios et al. [6] el objetivo principal de su trabajo fue cuantificar los valores de melanina y hemoglobina empleando valores de reflectancia difusa experimental de diferentes voluntarios, para la caracterización de las variables utilizaron el método de

Levenberg-Marquardt, un método numérico iterativo, minimizando el error entre la reflectancia difusa calculada y el valor experimental, el análisis que realizaron corresponde en el espectro de 500 a 800 nm, el modelo utilizado fue un modelo de una sola capa. El método empleado tiene desventajas como la falta de flexibilidad [7], la incapacidad de discernir entre incertidumbre [8], además de la falta de escalabilidad para muestras de gran tamaño [9]. Por lo tanto, el método Levenberg-Marquardt puede ser muy costoso computacionalmente y requerir de un tiempo muy prolongado para la caracterización de variables.

Un segundo trabajo consultado fue el realizado por González et al. [10], cuyo objetivo principal era obtener el índice de melanina de la piel mediante espectroscopia de reflectancia difusa, y así determinar la pigmentación de la parte interior del brazo. Sus resultados se compararon con diferentes tipos de fototipos de piel. El índice de melanina se determinaba usando la espectrometría de reflectancia difusa (DRS por sus siglas en inglés) sobre el intervalo de 620 a 720 nm.

Otro trabajo fue realizado por Naglič et al. [11] en el cual mediante las ecuaciones de aproximación difusa pudieron calcular algunos parámetros de la piel humana ajustando esas aproximaciones con datos experimentales de DRS. Ese ajuste lo efectuaron usando el método de mínimos cuadrados no lineales implementado como función lsqnonlin en MATLAB. El modelo de capas de la piel presentado fue de dos capas y las simulaciones ejecutadas fueron en el rango de 400 a 850 nm. Las desventajas del método DRS son: que requiere suposiciones sobre la naturaleza de la muestra, se debe suponer que es un medio opaco y homogéneo [12,13], no se detalla la absorción y dispersión de la luz [14,15], por lo que no permite una compresión precisa y detallada de la muestra. Además de no simular condiciones experimentales más complejas [16], en DRS las condiciones experimentales pueden ser difíciles de controlar.

Otra investigación fue realizada por Narea et al. [17], en este trabajo el objetivo era encontrar el coeficiente de absorción de la epidermis mediante series trigonométricas de Fourier. En su metodología utilizaban simulaciones de reflectancia difusa de un modelo de 3 capas utilizando el método Montecarlo en un rango espectral de 400 a 700 nm.

Un último antecedente visto en la literatura fue el reportado por Tsui et al. [18]. El objetivo de su estudio consistió en presentar un método eficiente capaz de estimar coeficientes de dispersión e información de cromóforos de la piel a partir de espectros de reflectancia difusa. Su metodología consistió primero en generar una base de datos utilizando simulaciones de reflectancia difusa de la piel para un modelo de capas con variaciones en cada uno de los parámetros de la piel. Después, utilizando mediciones experimentales de reflectancia difusa de diferentes voluntarios, estimaron los parámetros de la piel utilizando redes neuronales artificiales.

En nuestro trabajo de investigación se propone una metodología en la cual se combina el algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO por sus siglas en inglés, Particle Swarm Optimization) y el método Montecarlo para tejidos multicapa, para estimar diferentes parámetros de la piel. Se busca comprobar que esta metodología permite caracterizar el espectro de reflectancia difusa de cualquier persona de una manera no invasiva. Las principales diferencias entre los trabajos previos citados y el nuestro se encuentran los siguientes: se plantea emplear sólo ciertos valores de longitudes de onda para agilizar el proceso de cómputo, los valores de reflectancia difusa están dentro del rango de 410 a 1492 nm y se incluye la cuantificación de la concentración de agua en el modelo de capas de la piel.

2. Marco teórico

2.1 Método Montecarlo

El método Montecarlo para tejidos multicapa es un método en el cual mediante procesos probabilísticos se determina la trayectoria que seguirá la radiación electromagnética en diferentes

tejidos con múltiples capas, calculando y registrando el paso de los fotones esparcidos y absorbidos por cada una de las capas que conforman el medio analizado [19].

Las etapas de este método se pueden ver en el diagrama de la figura 1. Básicamente en este método se lanzan al medio una cierta cantidad de fotones uno por uno y en cada paso que da el fotón en el medio se verifica si ese fotón se reflejó, se absorbió o se esparció en el medio hasta llegar a un punto en el que el fotón deja de moverse dando por terminado el proceso de movimiento de ese fotón, este punto se determina mediante una probabilidad, cada fotón tiene un peso específico que al llegar a un valor mínimo o de umbral por medio de un proceso de ruleta se decide si este fotón se detiene o se sigue moviendo. Después se repite el procedimiento para cada uno de los fotones siguientes. Al terminar la cantidad de fotones se cuantifican la cantidad de fotones reflejados, absorbidos y transmitidos en valores de porcentajes.

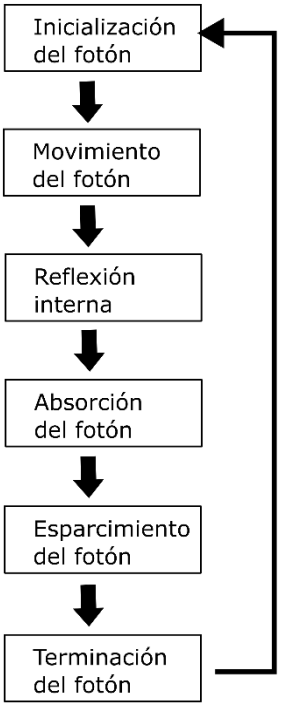


Figura 1. Etapas del Método Montecarlo para tejidos multicapa.

Para este trabajo se utilizó el programa MCML (Monte Carlo Multi Layer) creado por Wang et al. [5], este es un programa precompilado en el cual se introduce un archivo con los parámetros de cada una de las capas de la piel: índice de refracción, coeficiente de absorción, coeficiente de esparcimiento, factor de anisotropía y espesor. Este programa al terminar de realizar el método Montecarlo proporciona los porcentajes de reflectancia especular, reflectancia difusa, absorción y transmisión del medio estudiado, siendo de principal interés para este trabajo el valor de reflectancia difusa. Para las pruebas efectuadas se usaron 30000 fotones en cada longitud de onda analizada. Por el costo computacional se decidió seleccionar solamente un conjunto de 29 longitudes de onda en un rango de 410 a 1492 nm. Algunas de estas longitudes de onda fueron seleccionadas basándose en los puntos de absorción de las variables de la melanina, sangre y agua [20] y otras longitudes de onda fueron seleccionadas en base a otros trabajos [21]. Este método en nuestro trabajo fue utilizado para evaluar cada una de las partículas (posibles soluciones) del algoritmo PSO.

2.2 Modelo de capas de la piel

Para poder hacer las simulaciones de la propagación de la radiación electromagnética en la piel mediante el método Montecarlo es necesario contar con un modelo de capas de la piel en el cual este

definido para cada capa los siguientes parámetros: coeficiente de absorción, coeficiente de esparcimiento, índice de refracción, factor de anisotropía y espesor [22]. El modelo de capas utilizado está conformado por las 3 capas principales de la piel: epidermis, dermis e hipodermis. En la figura 2 se puede observar dicho modelo de capas con los 11 parámetros a caracterizar.

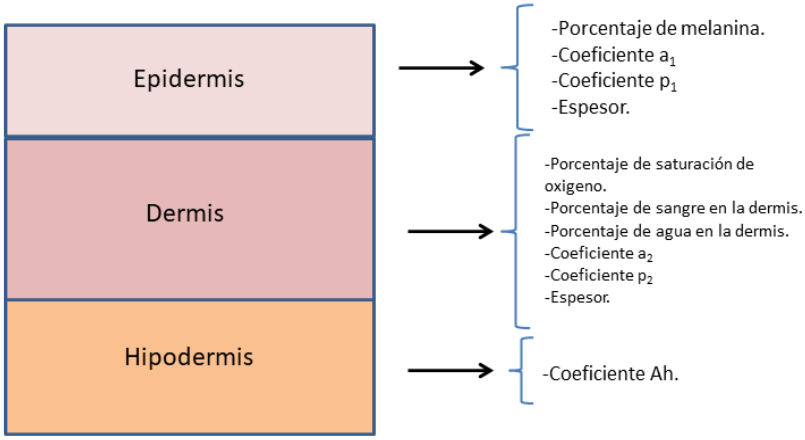


Figura 2. Modelo de capas de la piel.

La primera capa es la epidermis, es la capa más superficial, el coeficiente de absorción está definido por la cantidad de melanina contenida en ella [18].

$$\mu a_{epidermis}(\lambda) = (Pmel)(\mu a_{mel}) + (1 - Pmel)(\mu a_{base}) \quad (1)$$

En la ecuación 1, μamel es el coeficiente de absorción de un melanosoma cuyo valor es dependiente de la longitud de onda (λ), Pmel es el porcentaje de melanina y μabase es el coeficiente de absorción de la parte de la capa que no tiene melanina [21], este parámetro está representado por la ecuación 2.

$$\mu a_{base}(\lambda) = 0.244cm^{-1} + 85.3cm^{-1}\, exp\, exp\, \left(-\frac{\lambda - 154nm}{66.2nm}\right) \quad (2)$$

El coeficiente de esparcimiento reducido de la epidermis fue obtenido en base al trabajo de Jacques [20].

$$\mu s'_{epidermis}(\lambda) = a_1 \left(\frac{\lambda}{500nm}\right)^{-p_1} \quad (3)$$

Donde los coeficientes a1 y p1 son parte de los parámetros a caracterizar al igual que el espesor. El factor de anisotropía fue tomado como un valor constante de 0.715 para todos los puntos de longitud de onda [18]. Por último, el índice de refracción es considerado constante con un valor de 1.43 para esta capa [23].

La segunda capa es la dermis, el coeficiente de absorción de esta capa está determinado por la cantidad de sangre y la cantidad de agua contenida en ella [20].

$$\mu a.dermis(\lambda) = (Psder)(\mu a_{sangre}) + (Pagua)(\mu a_{agua}) + (1 - Psder - Pagua)(\mu a_{base}) \quad (4)$$

Los valores del coeficiente de absorción de agua se obtuvieron de datos reportados por Jacques [20], el coeficiente de absorción base (μabase) es el mismo utilizado para el caso de la epidermis donde se considera que es la parte de la dermis que no contiene sangre ni agua. El coeficiente de absorción de la sangre se obtuvo mediante la ecuación 5.

$$\mu a_{sangre}(\lambda) = (2.303)\left(\frac{G}{W}\right)\left(\varepsilon_{sangre}\right) \quad (5)$$

Donde G es la concentración de hemoglobina, considerada para todas las pruebas con un valor de 140 g/L, el cual representa un valor normal para personas saludables [24], W es el peso molecular de la hemoglobina el cual tiene un valor de 64500 g/mol [25], el coeficiente de extinción molar de la sangre εsangre está determinado por la saturación de oxígeno (S), la oxihemoglobina y la desoxihemoglobina.

$$\varepsilon_{sangre} = (S)(\varepsilon_{oxy}) + (1 - S)\left(\varepsilon_{desoxy}\right) \quad (6)$$

Los valores de oxihemoglobina (εoxy) y desoxihemoglobina (εdesoxy) fueron obtenidos de los datos presentados por Jacques [20]. El coeficiente de esparcimiento reducido está definido de la misma forma que la epidermis, con la diferencia que para la dermis los coeficientes correspondientes son a2 y p2. Los parámetros faltantes de esta capa, el índice de refracción y el factor de anisotropía fueron considerados constantes en todos los valores de longitudes de onda analizados, con valores de 1.43 para el índice de refracción [23] y 0.75 para el factor de anisotropía [18].

La última capa del modelo es la hipodermis, esta capa se considera de espesor infinito, con un coeficiente de absorción igual a 1 cm-1 [17], un factor de anisotropía de 0.8 de valor constante [17], un índice de refracción igual a 1 .41 para todos los valores de longitudes de onda [23] y el coeficiente de esparcimiento reducido está definido por la ecuación 7 donde Ah forma parte de los parámetros a caracterizar [11].

$$\mu s'_{hipodermis}(\lambda) = Ah\left[16.43\ cm^{-1} + 303.8\ exp\ exp\ \left(\frac{\lambda}{180.3\ nm}\right) cm^{-1}\right] \quad (7)$$

2.3 Algoritmo PSO

El algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) es un método de optimización que se basa en encontrar la mejor solución a una función objetivo mediante el movimiento de partículas a través de un espacio de búsqueda, siguiendo un conjunto de reglas para mover dichas partículas. En la figura 3 se puede observar el funcionamiento básico de este algoritmo, básicamente conforme las partículas se van moviendo en cada iteración, se van acercando a la mejor solución en el espacio de búsqueda [26].

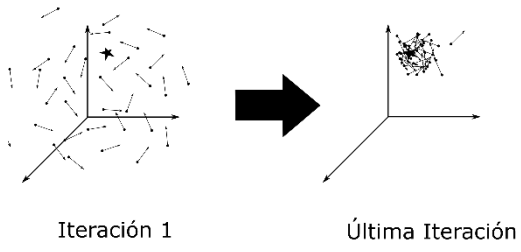


Figura 3. Principio básico del algoritmo PSO.

Cada partícula del enjambre representa una posible solución al problema de optimización, ya sea minimizando o maximizando la función objetivo. En cada iteración cada partícula se mueve a una velocidad y posición nueva, estos parámetros se van actualizando de acuerdo con las ecuaciones 8 y 9.

$$v_i^{k+1} = w.v_i^k + c_1.r_1.\left(pbest_i - x_i^k\right) + c_2.r_2.\left(gbest_i - x_i^k\right) \quad (8)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (9)$$

Donde xi representa la i-ésima partícula, vi es la velocidad de la partícula xi, pbest representa la mejor posición previa de xi y gbest representa la posición de la mejor partícula de todo el enjambre [27]. El parámetro w representa un valor de inercia con valores típicos entre 0.9 y 1.2 [28]. Los parámetros r1 y r2 representan valores aleatorios uniformemente distribuidos entre 0 y 1. Y los parámetros c1 y c2 representan el coeficiente de aceleración individual y el coeficiente de aceleración grupal (o del enjambre) respectivamente [27].

3. Metodología

3.1 Adquisición de la reflectancia difusa de la piel

El primer paso de la metodología fue obtener una serie de registros de la reflectancia difusa de la piel de diferentes voluntarios, utilizando un espectrofotómetro en el rango de 400 a 1500 nm en intervalos de 1 nm. El grupo de voluntarios fue conformado por 4 mujeres y 2 hombres de entre 21 y 28 años. La zona medida del cuerpo humano fue la parte dorsal de la mano, los valores obtenidos de reflectancia difusa para cada voluntario se pueden ver en la figura 4.

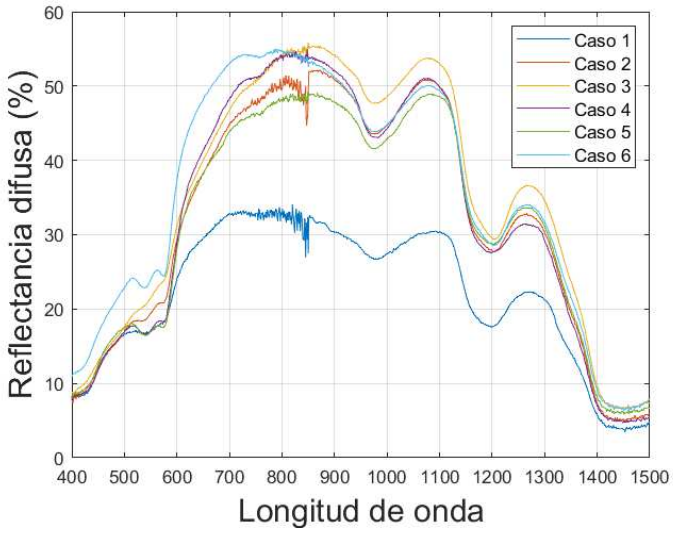


Figura 4. Reflectancia difusa experimental.

3.2 Algoritmo PSO-Montecarlo

El algoritmo propuesto consiste en utilizar el algoritmo PSO en conjunto con el método Montecarlo para caracterizar 11 parámetros de la piel, en la figura 5 se puede visualizar las entradas y salidas del algoritmo realizado.

Los 11 parámetros de la piel a caracterizar deben tener un rango de búsqueda en el cual el algoritmo PSO pueda encontrar la mejor solución. En la tabla 1 se presentan los límites mínimos y máximos de cada uno de los parámetros, estos límites fueron seleccionados basándose en trabajos previos de distintos autores [18][21].

Los algoritmos de optimización como el PSO necesitan una función matemática llamada función objetivo o función de aptitud la cual representa el problema a minimizar (o maximizar según sea el caso), para nuestro trabajo la función de aptitud estaba conformada por la ecuación 10 que representa el error medio absoluto entre la reflectancia difusa experimental (referencia) y la reflectancia difusa calculada por cada una de las partículas (usando el algoritmo Montecarlo) que se evalúan en el algoritmo PSO.

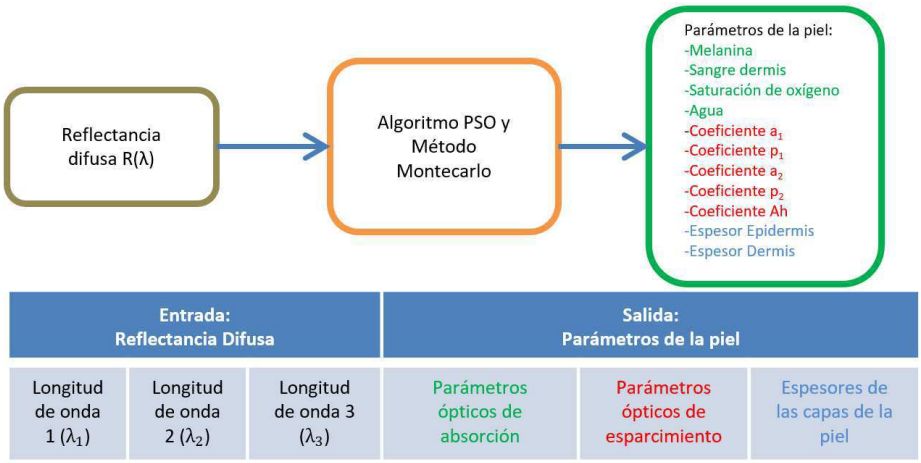


Figura 5. Diagrama de entradas y salidas del algoritmo PSO-Montecarlo.

Tabla 1. Límites de los parámetros de la piel.

Parámetro	Límite inferior	Límite superior
Porcentaje de melanina	0.001	0.15
Porcentaje de sangre en la dermis	0.001	0.2
Porcentaje de agua	0.01	1
Saturación de oxígeno	0.01	1
Coeficiente a1 del esparcimiento en epidermis	0.1	200
Coeficiente p1 del esparcimiento en epidermis	0.1	3
Coeficiente a2 del esparcimiento en dermis	0.1	200
Coeficiente p2 del esparcimiento en dermis	0.1	3
Coeficiente Ah del esparcimiento en hipodermis	0.1	3
Espesor de la epidermis	0.004	0.02
Espesor de la dermis	0.07	0.4

$$EAM = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \quad |Re - Rp(i)| \tag{10}$$

Donde n representa la cantidad de los puntos de reflectancia difusa, Re representa los valores de reflectancia experimental y Rp representa los valores de reflectancia difusa calculada para cada partícula del algoritmo PSO.

En la figura 6 se puede observar el diagrama de flujo para el algoritmo desarrollado PSO-Montecarlo.

El enjambre inicial del PSO se genera de manera aleatoria colocando las partículas en diferentes posiciones dentro del espacio de búsqueda. Al terminar el proceso de iteraciones del PSO, se selecciona la partícula con el menor valor de error absoluto y esa partícula representa el mejor conjunto de parámetros con los cuales la reflectancia difusa calculada se aproxima a los datos reales de reflectancia difusa.

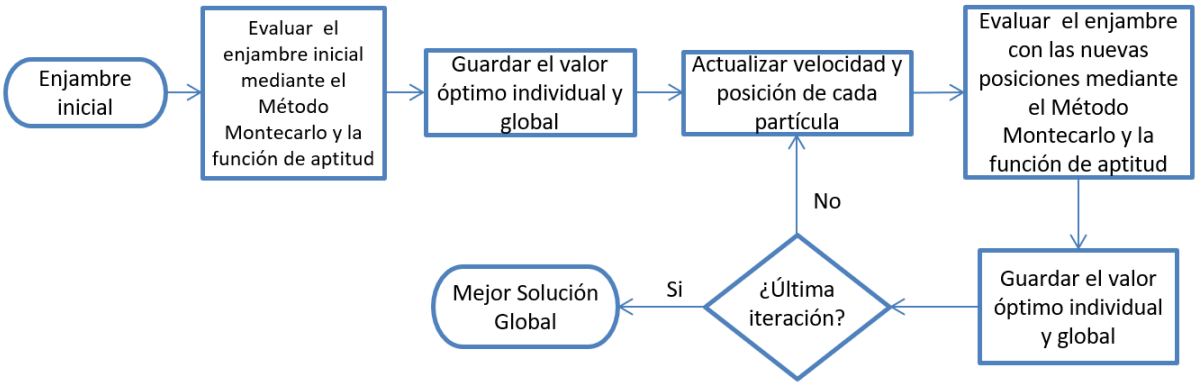


Figura 6. Diagrama de flujo del algoritmo PSO-Montecarlo.

4. Resultados

Al utilizar el algoritmo PSO-Montecarlo lo primero que se realizó fue definir los parámetros de dicho algoritmo como lo son: cantidad de partículas (Np), número de iteraciones (I), coeficiente de aceleración individual (c1), coeficiente de aceleración grupal (c2) y el valor del factor inercial (w).

En las primeras pruebas realizadas se utilizaron valores típicos de los coeficientes de aceleración individual y global y del factor inercial, con valores de 1.5 para ambos coeficientes de aceleración y un valor de 1 para el factor inercial [29]. En la tabla 2 se pueden observar los resultados obtenidos con los valores típicos y con valores diferentes para uno de los casos analizados (Caso 1).

Tabla 2. Parámetros obtenidos con diferentes valores de coeficientes de aceleración.

Parámetro	***C_1=0.5 C_2=0.5***	***C_1=1.5 C_2=1.5***	***C_1=3 C_2=3***
Melanina (%)	3.91	3.20	3.43
Sangre en dermis (g/L)	0.1012	0.0204	0.1366
Agua (%)	68.28	28.28	56.54
Saturación de Oxigeno (%)	61.27	56.80	99.30
Coeficiente a_1	145.1895	97.2126	154.1811
Coeficiente p_1	1.9757	1.9678	1.8626
Coeficiente a_2	119.7731	79.2685	42.7086
Coeficiente p_2	2.75492	2.9253	2.7339
Coeficiente Ah	1.5860	0.2725	0.9671
Espesor Epidermis (cm)	0.0127	0.0141	0.0114
Espesor Dermis (cm)	0.1874	0.1072	0.0994

En la figura 7 se puede observar los errores absolutos obtenidos con diferentes valores de coeficientes de aceleración individual y global (c1 y c2 respectivamente), resultados que muestran que con un valor de 1.5 para ambos coeficientes se obtiene el mínimo error absoluto. Los demás parámetros del PSO fueron 50 partículas, 15 iteraciones y un factor inercial igual a 1.

En la tabla 3 se pueden observar los resultados obtenidos con diferentes valores de factor inercial para uno de los casos de estudio (Caso 1). Los demás parámetros del PSO fueron 50 partículas, 15 iteraciones y un valor de 1.5 para ambos coeficientes de aceleración.

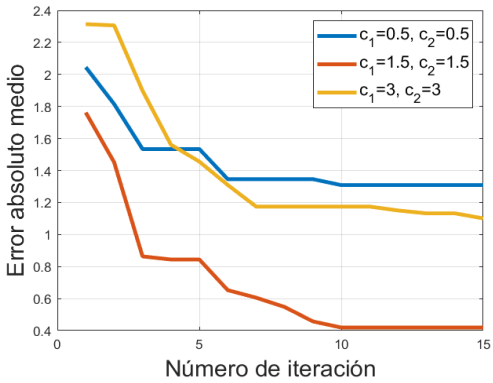


Figura 7. Errores obtenidos para diferentes valores de coeficientes de aceleración.

Tabla 3. Parámetros obtenidos con diferentes valores de factor inercial.

Parámetro	***W=0.5***	***W=1***	***W=3***
Melanina (%)	0.0479914	3.20	0.04562456
Sangre en dermis (g/L)	0.01018653	0.0204	0.01235053
Agua (%)	0.22343871	28.28	0.94921338
Saturación de Oxígeno (%)	0.71830257	56.80	0.63399087
Coeficiente a_1	148.247969	97.2126	112.772492
Coeficiente p_1	2.06299766	1.9678	1.44126592
Coeficiente a_2	39.2572631	79.2685	32.983744
Coeficiente p_2	2.25338701	2.9253	0.91121377
Coeficiente Ah	0.63782346	0.2725	0.1
Espesor Epidermis (cm)	0.00993954	0.0141	0.00726685
Espesor Dermis (cm)	0.27372497	0.1072	0.07392193

En la figura 8 se presentan los valores obtenidos del error absoluto medio para cada uno de los factores inerciales en cada una de las iteraciones. Observando que con valores de 1 y 3 para el factor inercial se obtienen los menores errores absolutos. Con base en esto se decidió dejar el valor de factor inercial igual a 1 para las demás pruebas realizadas.

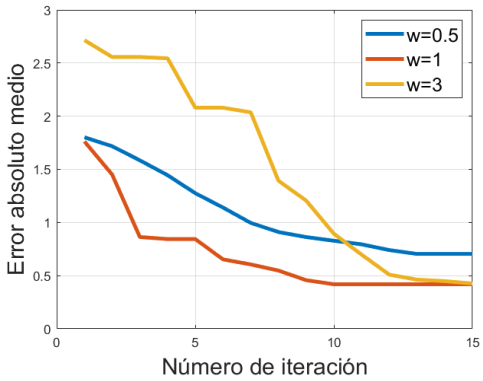


Figura 8. Errores obtenidos para diferentes valores del factor de inercia.

Los resultados siguientes corresponden a los parámetros obtenidos con diferentes valores de número de partículas e iteraciones. Para estos parámetros no se encontraron valores típicos en la literatura, por lo que se decidió probar todos los casos de estudio con diferentes valores de estos parámetros.

En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos con un número de partículas iguales a 30 y 15 iteraciones. Los demás parámetros del PSO fueron: un factor inercial de 1 y un valor de 1.5 en ambos coeficientes de aceleración. Estas pruebas realizadas tomaron alrededor de 160 minutos (en cada caso) para obtener los parámetros de la piel.

Tabla 4. Parámetros obtenidos con 30 partículas y 15 iteraciones.

Parámetro	***Caso 1***	***Caso 2***	***Caso 3***	***Caso 4***	***Caso 5***	***Caso 6***
Melanina (%)	3.38	5.38	2.88	1.75	4.77	2.40
Sangre en dermis (g/L)	0.1332	0.0157	0.0146	0.0320	0.0199	0.0552
Agua (%)	41.01	49.70	74.43	83.98	42.18	65.72
Saturación de Oxigeno (%)	64.01	87.65	43.14	41.79	51.57	69.48
Coeficiente a_1	136.6378	123.4327	73.4463	54.9846	69.8268	134.4388
Coeficiente p_1	1.9474	1.5494	1.2092	1.39	1.3207	0.8928
Coeficiente a_2	80.3454	139.5139	168.31824	50.9632	62.8446	87.7661
Coeficiente p_2	2.8832	2.3798	2.0915	0.8703	1.2982	1.9409
Coeficiente Ah	0.7627	2	0.5126	0.9204	0.8840	0.4428
Espesor Epidermis (cm)	0.0129	0.0077	0.0130	0.01209	0.0063	0.0059
Espesor Dermis (cm)	0.2119	0.3827	0.3290	0.2348	0.18945315	0.2096

Los errores absolutos medios finales se pueden ver en la tabla 5. Se observa que con estos parámetros de partículas e iteraciones algunos de los casos (Caso 1 y Caso 6) tienen un error final mayor a uno, lo cual representa que con estos parámetros del PSO el algoritmo no funciona para todos los casos.

Tabla 5. Error absoluto medio con 30 partículas y 15 iteraciones.

Caso	**Error absoluto medio (Solución)**
1	1.2117
2	0.3614
3	0.5176
4	0.6323
5	0.6799
6	1.2605

En la figura 9 se presentan las gráficas de los errores obtenidos con 30 partículas y 15 iteraciones para cada uno de los casos.

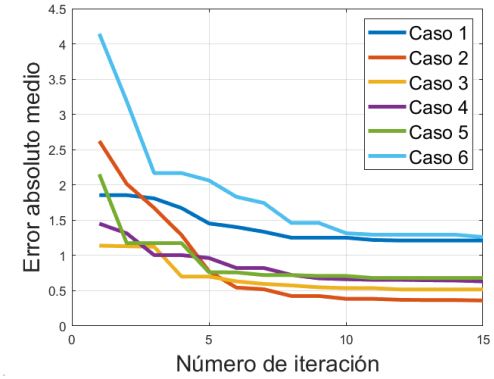


Figura 9. Errores obtenidos con 30 partículas y 15 iteraciones.

En la tabla 6 se presentan los parámetros obtenidos para cada caso con 50 partículas y 15 iteraciones. Estas pruebas realizadas tomaron aproximadamente 300 minutos en cada caso para obtener los parámetros de la piel.

Tabla 6. Parámetros obtenidos con 50 partículas y 15 iteraciones.

Parámetro	*Caso 1*	*Caso 2*	*Caso 3*	*Caso 4*	*Caso 5*	*Caso 6*
Melanina (%)	3.20	3.69	3.75	4.05	4.27	3.02
Sangre en dermis (g/L)	0.0204	0.0194	0.0107	0.0437	0.0544	0.0190
Agua (%)	28.28	74.55	76.76	83.49	45.94	45.74
Saturación de Oxígeno (%)	56.80	56.72	67.93	70.40	62.94	79.13
Coeficiente a_1	97.2126	80.0166	97.4163	84.4513	116.2025	92.5727
Coeficiente p_1	1.9678	2.0343	1.1742	1.6077	1.0656	2.2530
Coeficiente a_2	79.2685	163.4509	102.0470	121.8922	107.8457	109.5097
Coeficiente p_2	2.9253	1.7808	1.6982	1.5560	2.2896	1.4830
Coeficiente Ah	0.2725	1.1197	1.1025	1.2584	0.8277	1.8737
Espesor Epidermis (cm)	0.0141	0.0111	0.0099	0.0076	0.0067	0.0079
Espesor Dermis (cm)	0.1072	0.1793	0.2534	0.1713	0.2305	0.3064

En la tabla 7 se muestran los errores absolutos medios obtenidos al realizar las pruebas con 50 partículas y 15 iteraciones para cada uno de los casos. Se puede observar que todos los errores obtenidos son menores a uno, obteniendo mejores resultados que los parámetros anteriores del PSO (30 partículas y 15 iteraciones).

Tabla 7. Error absoluto medio con 50 partículas y 15 iteraciones.

Caso	Error absoluto medio (Solución)
1	0.4148
2	0.3914
3	0.4949
4	0.5203
5	0.3568
6	0.6954

En la figura 10 se presentan las gráficas de los errores obtenidos con 50 partículas y 15 iteraciones para cada uno de los casos.

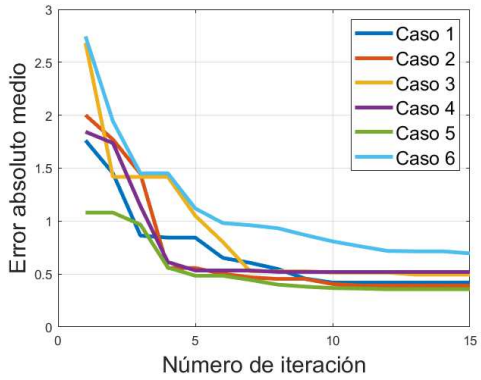


Figura 10. Errores absolutos medios con 50 partículas y 15 iteraciones.

En la tabla 8 se observan los parámetros obtenidos con 100 partículas y 20 iteraciones en el algoritmo propuesto. Para cada uno de los casos el algoritmo tardó aproximadamente 700 minutos.

Tabla 8. Parámetros obtenidos con 100 partículas y 20 iteraciones.

Parámetro	*Caso 1*	*Caso 2*	*Caso 3*	*Caso 4*	*Caso 5*	*Caso 6*
Melanina (%)	4.74	4.83	2.44	3.68	4.48	1.88
Sangre en dermis (g/L)	0.0095	0.0190	0.0071	0.0339	0.0543	0.0328
Agua (%)	52.63	52.14	70.51	95.16	56.51	66.63
Saturación de Oxígeno (%)	97.84	55.78	48.69	57.02	73.30	96.35
Coeficiente a_1	154.7263	97.0656	66.0614	85.1689	133.6622	68.7580
Coeficiente p_1	1.7093	1.8673	1.6085	1.4589	1.2718	1.6602
Coeficiente a_2	25.0994	154.3490	62.7796	80.0793	98.1900	193.6637
Coeficiente p_2	2.2024	2.10770	0.8569	1.1501	1.9382	1.9541
Coeficiente Ah	0.7594	1.1683	1.0585	1.8124	1.0531	0.8851
Espesor Epidermis (cm)	0.0102	0.0080	0.0143	0.0080	0.0069	0.0139
Espesor Dermis (cm)	0.2452	0.1942	0.3597	0.1699	0.2825	0.2403

Los valores de los errores absolutos medios obtenidos con 100 partículas y 20 iteraciones se pueden observar en la tabla 9. Se puede observar que algunos de los valores obtenidos son ligeramente más pequeños a las pruebas con 50 partículas y 15 generaciones.

Tabla 9. Error absoluto medio con 100 partículas y 20 iteraciones.

Caso	Error absoluto medio (Solución)
1	0.6141
2	0.3921
3	0.5130
4	0.5061
5	0.2917
6	0.5877

En la figura 11 se presentan las gráficas de los errores obtenidos con 100 partículas y 20 iteraciones para cada uno de los casos. Una desventaja de utilizar esta cantidad de partículas e iteraciones es el tiempo que tarda el algoritmo en encontrar los parámetros de la piel para cada caso.

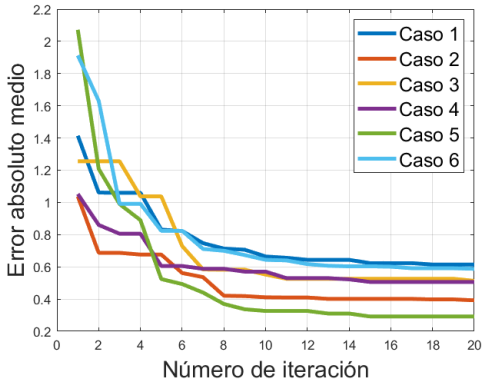


Figura 11. Errores absolutos medios con 100 partículas y 20 iteraciones.

En las figuras siguientes se presentan las gráficas de la reflectancia difusa experimental y las reflectancias difusas obtenidas con el algoritmo PSO-Montecarlo para diferentes parámetros de número de partículas e iteraciones, los demás parámetros del algoritmo se dejaron constantes con valores de 1 para el factor inercial y con valor de 1.5 para ambos coeficientes de aceleración. En la figura 12 se presenta la comparación de los valores de reflectancia difusa obtenidos con cada número de partículas (Np) e iteraciones (I) y los valores de reflectancia difusa experimental del caso 1. Las mayores diferencias se presentan en los puntos de 800 y 900 nm.

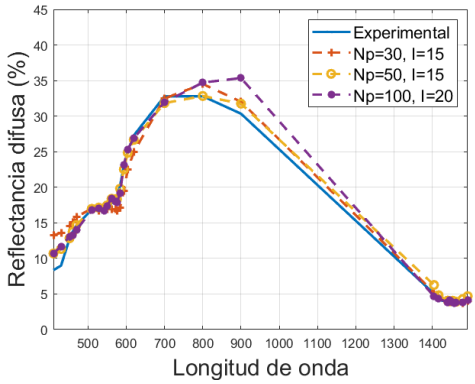


Figura 12. Reflectancias difusas experimentales y calculadas para el caso 1.

En la figura 13 se presenta la comparación de los valores de reflectancia difusa obtenidos con cada número de partículas (Np) e iteraciones (I) y los valores de reflectancia difusa experimental del caso 2.

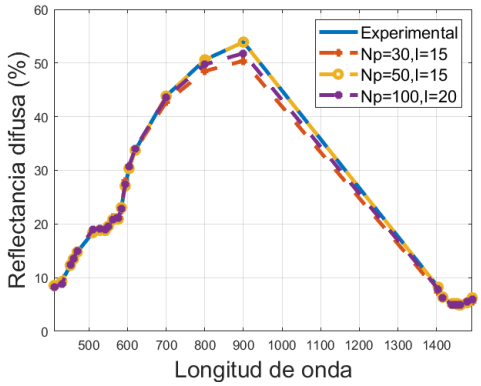


Figura 13. Reflectancias difusas experimentales y calculadas para el caso 2.

Para el caso 3 las gráficas correspondientes se presentan en la figura 14. Se observa que para este caso los valores calculados son aproximadamente iguales a los valores experimentales de reflectancia difusa.

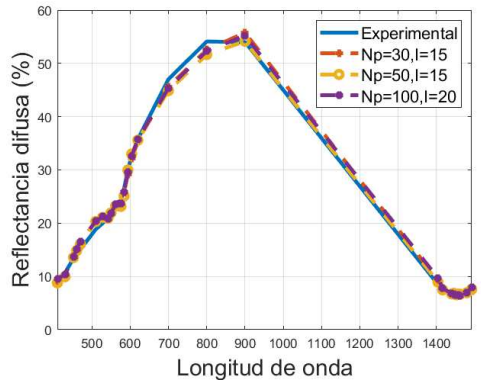


Figura 14. Reflectancias difusas experimentales y calculadas para el caso 3.

En la figura 15 se presenta la comparación de los valores de reflectancia difusa obtenidos con cada número de partículas (Np) e iteraciones (I) y los valores de reflectancia difusa experimental del caso 4.

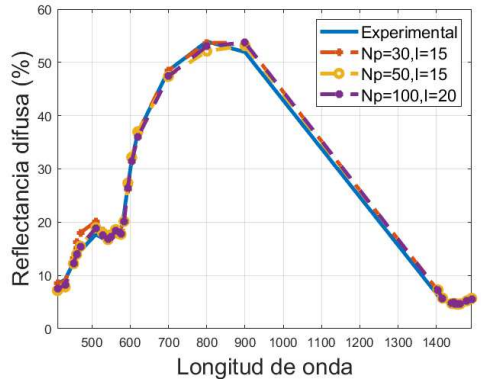


Figura 15. Reflectancias difusas experimentales y calculadas para el caso 4.

En la figura 16 se presenta la comparación de los valores de reflectancia difusa obtenidos con cada número de partículas (Np) e iteraciones (I) y los valores de reflectancia difusa experimental del caso 5. En este caso los valores calculados y experimentales son aproximadamente iguales.

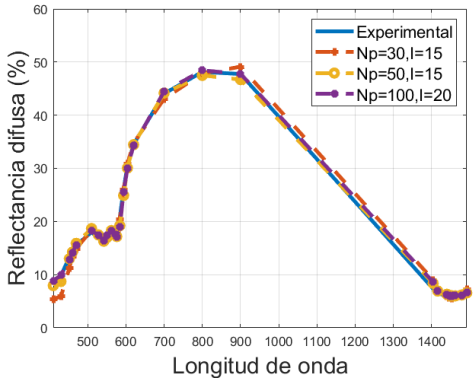


Figura 16. Reflectancias difusas experimentales y calculadas para el caso 5.

En la figura 17 se presenta la comparación de los valores de reflectancia difusa obtenidos y los valores de reflectancia difusa experimental del caso 6. Este fue el caso en el cual el algoritmo PSO-Montecarlo tuvo las mayores diferencias entre los valores de reflectancias.

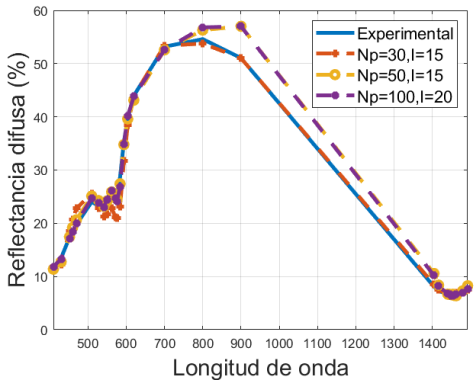


Figura 17. Reflectancias difusas experimentales y calculadas para el caso 6.

5. Conclusiones

Con los resultados obtenidos se observó que con la metodología propuesta conformada por el algoritmo PSO y el Método Montecarlo, se pueden obtener diferentes parámetros de las capas de la piel, eligiendo de manera correcta los parámetros del PSO (número de partículas, iteraciones, factor de inercia etc.), también se observó que los parámetros típicos de los coeficientes de aceleración y del factor inercial consultados en la literatura fueron adecuados para este problema de optimización.

De las pruebas realizadas con diferentes cantidades de partículas e iteraciones se vio que con una cantidad mínima de 50 partículas y 15 iteraciones se pueden encontrar valores aceptables de los parámetros de la piel. Al aumentar los parámetros de cantidad de partículas e iteraciones la solución mejoró ligeramente sin embargo el costo computacional fue mayor con lo que se optó por mantener los valores mínimos mencionado de cantidad de partículas e iteraciones.

Se pudo notar que la mayoría de los parámetros para todos los casos daban similares esto debido a que los voluntarios están dentro de un rango específico de edad y son personas con un buen estado

de salud, sin embargo, hubo algunos parámetros obtenidos en los cuales la diferencia entre casos era notable, estas diferencias pudieron ocurrir por diferentes razones como por ejemplo el impacto o la sensibilidad de los parámetros de la piel en los valores de longitud de onda seleccionados. Otro factor puede ser debido al modelo de capas de la piel utilizado es decir la falta de algunas sustancias presentes en la piel no consideradas en el modelo de capas que afecten a la reflectancia difusa de la misma.

En trabajo a futuro se busca comparar los parámetros obtenidos con esta metodología, con datos ya publicados de la literatura, otro punto que se planea realizar es seguir probando el algoritmo propuesto con más casos de estudio, con personas saludables, pero con una diferencia de edad mayor y también realizar pruebas con voluntarios que sufran de algún tipo de enfermedad en la piel como deshidratación, trastornos de pigmentación etc.

Referencias

[1] Moreiras, H., O'Connor, C., Bell, M., & Tobin, D. J. *“Visible light and human skin pigmentation: The importance of skin phototype.” Experimental Dermatology*, vol. 30, no 9, p. 1324-1331, 2021.
[2] Goehring, M. T., Farran, J., Ingles-Laughlin, C., Benedista-Seelman, S., & Williams, B. "*Measures of Skin Turgor in Humans: A Systematic Review of the Literature."* Wound Management & Prevention vol. 68, no 4, p. 14-24, 2022.
[3] Van Gemert, M. J. C., Jacques, S. L., Sterenborg, H. J. C. M., & Star, W. M. *"Skin optics."* IEEE Transactions on biomedical engineering, vol. 36, no 12, p. 1146-1154, 1989.
[4] Bunke, J., Sheikh, R., Reistad, N., & Malmsjö, M. "*Extended-wavelength diffuse reflectance spectroscopy for a comprehensive view of blood perfusion and tissue response in human forearm skin.*" Microvascular Research vol. 124, p. 1-5, 2019.
[5] Wang, L., Jacques, S. L., & Zheng, L. "*MCML—Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues.*" *Computer methods and programs in biomedicine,* vol. 47, no 2, p. 131-146, 1995.
[6] Zonios, G., Bykowski, J., & Kollias, N. *“Skin melanin, hemoglobin, and light scattering properties can be quantitatively assessed in vivo using diffuse reflectance spectroscopy." Journal of Investigative Dermatology*, vol. 117, no 6, p. 1452-1457, 2001.
[7] Wang, H. “*Monte Carlo simulation with applications to finance”*. CRC Press, 2012.
[8] Zhang, J. “*Modern Monte Carlo methods for efficient uncertainty quantification and propagation: A survey.” Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, vol. 13, no 5, p. e1539, 2021.
[9] Smith, R. C. “*Uncertainty quantification: theory, implementation, and applications”*. Siam, vol. 12 2013.
[10] González, F. J., Martínez-Escanamé, M., Muñoz, R. I., Torres-Álvarez, B., & Moncada, B. *"Diffuse reflectance spectrophotometry for skin phototype determination." Skin Research and Technology*, vol. 16, no 4, p. 397-400, 2010.
[11] Naglič, P., Vidovič, L., Milanič, M., Randeberg, L. L., & Majaron, B. *"Applicability of diffusion approximation in analysis of diffuse reflectance spectra from healthy human skin." Biophotonics—Riga,* SPIE, Vol. 9032, p. 137-148, 2013.
[12] Kienle, A., and Patterson, M. S. *“Improved solutions of the steady-state and the time-resolved diffusion equations for reflectance from a semi-infinite turbid medium.” JOSA A*, vol. 14, no 1, p. 246-254, 1997.
[13] Tricoli, U., Macdonald, C. M., Silva, D., & Markel, V. A. *“A new Monte Carlo simulation package for light transport in biological tissues and an application to detailed analysis of the diffusion approximation accuracy near the boundaries.”* European Conferences On Biomedical Optics *(ECBO)*, 2017.
[14] Boas, D. A., & Yodh, A. G. *“Spatially varying dynamical properties of turbid media probed with diffusing temporal light correlation.” JOSA A*, vol. 14, no 1, p. 192-215, 1997.
[15] Żołek, N., Rix, H., & Botwicz, M. *“Analysis of estimation of optical properties of sub superficial structures in multi layered tissue model using distribution function method.” Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 183, p. 105084, 2020.
[16] Hamdy, O., & Solouma, N. H. *“Distant-detector versus integrating sphere measurements for estimating tissue optical parameters: a comparative experimental study.” Optik*, vol. 247, p. 167981, 2021.

[17] *Narea, F., Vivas, S., & Muñoz, A. "Retrieving the absorption coefficient of epidermis in human skin." Óptica pura y aplicada*, vol. 48, no 3, p. 207-214, 2015.
[18] Tsui, S. Y., Wang, C. Y., Huang, T. H., & Sung, K. B. *"Modelling spatially-resolved diffuse reflectance spectra of a multi-layered skin model by artificial neural networks trained with Monte Carlo simulations." Biomedical optics express*, vol. 9, no 4, p. 1531-1544, 2018.
[19] Prahl, S. A. "*A Monte Carlo model of light propagation in tissue." En Dosimetry of laser radiation in medicine and biology.* SPIE*, p. 105-114, 1989.*
[20] Jacques, S. L. *"Optical properties of biological tissues: a review."* Physics in Medicine & Biology, vol. 58, no 11, p. R37, 2013.
[21] Verdel, N., Marin, A., Milanič, M., & Majaron, B. "*Physiological and structural characterization of human skin in vivo using combined photothermal radiometry and diffuse reflectance spectroscopy." Biomedical optics express,* vol. 10, no 2, p. 944-960, 2019.
[22] Jurovata, D., Kurnatova, J., Ley, S., Laqua, D., Vazan, P., & Husar, P. *"Simulation of photon propagation in tissue using Matlab". Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology,* vol. 21, no Special-Issue, p. 31-36b, 2013.
[23] Bashkatov, A. N., Genina, E. A., Kochubey, V. I., & Tuchin, V. V. "*Optical properties of the subcutaneous adipose tissue in the spectral range 400–2500 nm*." Optics and spectroscopy, vol. 99, p. 836-842, 2005
[24] Zakai, N. A., Katz, R., Hirsch, C., Shlipak, M. G., Chaves, P. H., Newman, A. B., & Cushman, M. *"A prospective study of anemia status, hemoglobin concentration, and mortality in an elderly cohort: the Cardiovascular Health Study." Archives of internal medicine*, vol. 165, no 19, p. 2214-2220, 2005.
[25] Maeda, T., Arakawa, N., Takahashi, M., & Aizu, Y. "*Monte Carlo simulation of spectral reflectance using a multilayered skin tissue model." Optical review,* vol. 17, p. 223-229, 2010.
[26] Marini, F., & Walczak, B. *"Particle swarm optimization (PSO). A tutorial."* Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, vol. 149, p. 153-165, 2015.
[27] Duarte, C., & Quiroga, J. "*Algoritmo PSO para identificación de parámetros en un motor DC." Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no 55, p. 116-124, 2010.
[28] Wang, S., Zhou, F., & Wang, F. "*Effect of Inertia Weight ω on PSO-SA Algorithm." International Journal of Online Engineering,* vol. 9. 2013.
[29] Liu, S., Liu, W., Huang, F., Yin, Y., Yan, B., & Zhang, T. *"Multitarget allocation strategy based on adaptive SA-PSO algorithm." The Aeronautical Journal*, vol. 126, no 1300, p. 1069-1081, 2022.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 2, pp. 18 – 31
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Diseño y construcción de un prototipo médico de electroterapia y presión negativa con fines demostrativos

Gaona Adame Eder Antonio, Peñaloza Mendoza Guillermo Rey, Castro Zenil Mario Salvador

División de Ingeniería Biomédica, Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro
grey@itspa.edu.mx

Resumen

El propósito de este proyecto, es el de brindar un tratamiento alternativo e innovador para los pacientes que sufren de heridas crónicas avanzadas, ya sea por incapacidades que los mantenga en una posición estática por un largo tiempo o por enfermedades degenerativas que impidan la correcta cicatrización de la piel. Esto por medio del diseño y construcción de un dispositivo médico que combine las técnicas de aplicación de microcorrientes eléctricas pulsadas y de alta frecuencia con la terapia de presión negativa para así lograr una mejora en el avance de la curación y cicatrización en este tipo de padecimientos. Logrando de esta manera, atacar la herida a nivel celular con la microcorriente y a nivel tisular por medio de la terapia de presión negativa.

Palabras clave: Electroterapia, Presión Negativa, Dispositivo Médico, Heridas Crónicas

1. Introducción

Una herida crónica es un tipo de herida, la cual no sana de manera adecuada y en un periodo demasiado prolongado, teniendo un proceso de cicatrización anormal y demasiado tardado, lo anterior puede ser causado debido a enfermedades crónico degenerativas como la diabetes, enfermedades cardiovasculares, sedentarismo, inmunodepresión, isquemia, entre otras. Esto causa a su vez depresión en los pacientes, mala calidad de vida y en situaciones más complejas sepsis, gangrena o la amputación del miembro afectado.

Por otro lado, la cicatrización es una serie de acontecimientos o pasos que culminan en la restauración del tejido en su totalidad y en la normalización de sus funciones. Los pasos necesarios para la cicatrización son básicamente cinco: Respuesta vascular y coagulación de la sangre; Inflamación; Formación de tejido de granulación (reparación de la dermis); Epitelización (formación de una nueva epidermis); Remodelado del tejido cicatricial [1].

En su libro Principios de Anatomía y Fisiología 13.a Edición, los autores Tortora y Derrickson, hablan de que la cicatrización es un proceso llevado a cabo para la homeostasis del cuerpo y que se puede clasificar en dos, la cicatrización de las heridas epidérmicas y la cicatrización de las heridas profundas, esta investigación se centrara en la de las heridas profundas [2].

La piel, siendo el órgano más grande del cuerpo humano, está formado por la unión de millones de células al igual que los demás tejidos. Estas células a su vez denotan comportamientos eléctricos en sus funciones, entre ellos destaca la capacidad de crear diferencias de potenciales eléctricos para su comunicación y nutrición, es por esto que la teoría revela que se puede manipular estos campos eléctricos con el fin de restaurar la comunicación de las células o de sus actividades, cuando estas se ven afectadas por una herida o por una patología.

Los campos endógenos de la piel, hacen referencia a un fenómeno que sucede dentro del medio del tejido, en concreto se refiere a los campos bioeléctricos que se generan en la piel, a causa de los fluidos tanto intracelulares como extracelulares que proporcionan un medio conductor para las cargas que viajan entre célula y célula. Como lo explican Berral y Rodríguez en su artículo del año 2007 Impedancia bioeléctrica y su aplicación en el ámbito hospitalario, “Cuando se aplica un campo de corriente alterna, a medida que se aumenta la frecuencia, la pared celular pierde su efecto de capacitancia, es decir, la resistencia generada por la membrana celular, dejando así pasar la corriente” [3]. Es así que se puede entender por las observaciones de Berral y Rodríguez que la bioimpedancia natural de la piel se puede vencer cuando se le aplica un campo exógeno, por supuesto con las frecuencias adecuadas y con la implementación de corriente alterna de bajo voltaje.

Una herida, sea o no crónica, presenta características bioeléctricas en ella, ya que, en un padecimiento causado por un traumatismo, a nivel celular, el tejido se ve afectado también eléctricamente, como lo comenta Guarín-Corredor y col. En su investigación Proceso de Cicatrización de heridas de piel, campos endógenos y su relación con las heridas crónicas. Ellos mencionan que entre la capa dérmica y el estrato corneo, se genera un campo eléctrico con un voltaje aproximado de entre 8 y 60 mV, y este campo se puede ver afectado por una herida, ya que, ante la presencia de una lesión se altera este circuito eléctrico [4].

El trabajo de Owoeye [5] fue el primero que utilizó la corriente eléctrica directamente sobre tendones dañados de ratas, con la esperanza de promover la curación. El resultado fue que los tendones de los roedores tratados con corriente anodal eran más fuertes que aquellos que fueron curados sin ninguna estimulación y que éstos eran más fuertes que los tratados con el cátodo. Otro estudio realizado en 1996 por Balcavage et al observaron que la corriente eléctrica inducida en el tejido a frecuencias bajas (50-60 Hz) tiene un efecto directo sobre la membrana celular [6].

En 1990, Reich y Tarjan demostraron que la estimulación eléctrica pulsada tiene más ventajas que la corriente continua unidireccional, pues permite mayores densidades de corriente sin el riesgo de quemaduras. Además, la corriente pulsada provoca una vascularización mayor que la corriente constante [7].

Otra técnica para el tratamiento de las heridas crónicas, es la terapia por presión negativa, que utiliza un procedimiento en el cual por medio de un sellado de la herida se logra crear un vacío que genera un ambiente prolifero para la curación, ya que la implementación de presiones subatmosféricas genera propiedades para la aceleración de las fases de cicatrización.

Argenta y Morykwas (1997), describieron la presión tópica negativa como una práctica que consiste en la aplicación en el lecho de la herida de una esponja porosa conectada a través de un tubo a una bomba de vacío y cubierta con un apósito adherente. Se consigue de esta forma aplicar una presión controlada continua o intermitente, en un intervalo de valores de entre 50 y 125 mmHg sobre el lecho de la herida [8].

Según comenta Najarro y col. en su investigación del año 2014, Terapia por presión negativa en el manejo de heridas en traumatología. Innovación e Indicación. Afirma que la terapia por presión negativa (TPN) “consiste en la aplicación de presión subatmosférica al lecho de una herida, como forma de tratamiento tópico y no invasivo de la misma, facilitando la cicatrización a través de una acción multimodal” [9].

Actualmente la terapia por presión negativa, representa una alternativa especialmente eficaz para el tratamiento de las heridas crónicas, ya que este tipo de padecimientos crean problemáticas importantes para los pacientes que no logran sanar de una forma adecuada o en un tiempo corto. Así mismo es una herramienta sumamente útil para los médicos y enfermeras de los hospitales que evitan el uso excesivo de apósitos y debridamientos innecesarios y dolorosos para el paciente.

Pareciera que esta terapia es una técnica milagrosa que resuelve casi en su totalidad la problemática, sin embargo, no es muy utilizada especialmente en México dado el costo de los

consumibles, que debido a las patentes y a los materiales de los cuales están hechos representan costos demasiado elevados para el sector de salubridad.

El tratamiento de las heridas crónicas, es un tema de relevancia que se ha intentado resolver desde hace décadas, ya que es un padecimiento grave que afecta a un número elevado de la población, por lo mismo se cuenta ya con las bases teóricas para poder abordar la idea de la construcción de un dispositivo como el que se piensa realizar. En el caso de esta investigación, se centra en técnicas de microcorriente eléctrica y presión negativa, las cuales en conjunto no han sido estudiadas, por lo tanto, se tiene como principal objetivo la construcción de un prototipo que permita la aplicación de las dos técnicas en conjunto, para posteriormente evaluar su pertinencia en un protocolo médico y verificar si en conjunto las dos técnicas presentan mejores resultados en el proceso de curación de una herida.

2. Metodología

Se propone una alternativa para las personas que sufren de padecimientos a causa de las úlceras por presión, debido a que actualmente, los métodos de terapia son costosos y otorgan resultados no garantizados. Para lograr esto se combinan las técnicas de electroestimulación y presión negativa sobre la herida, a través de los se genera tratamiento tanto a nivel celular como a nivel tisular a bajo costo. De esta forma los pacientes tienen la oportunidad de un mejor tratamiento para las ulceras.

Objetivo: *Construir un prototipo capaz de suministrar corrientes exógenas pulsadas de alta frecuencia, con la combinación de la técnica de terapia de presión negativa a un área específica del cuerpo humano afectada por una herida crónica.*

Es así que el proyecto se basa en los manuales e investigaciones que establecen criterios generales de para la aplicación de electroestimulación como la de terapia de presión negativa de los dispositivos médicos existentes en el mercado.

La metodología empleada para el proceso de la generación y aplicación de la presión negativa fue seleccionada en base a los criterios y parámetros proporcionados por la investigación de Najarro et. al. [9], en la que se menciona que a partir de la experiencia clínica y estudios de investigación con animales se ha podido comprobar que la terapia intermitente es más eficaz en la promoción de tejido de granulación, mientras que el modo continuo recoge el exudado y es útil en los casos de fístulas y linforragia. Asimismo, la presión idónea se encuentra en el rango de 125 a 200 mmHg [9].

Con respecto a la metodología utilizada en la aplicación de la microcorriente, se toman como referencia los valores obtenidos de la investigación de Guarda et. al. (2012), donde utilizaron valores de frecuencia de 5 Hz para los impulsos e intensidad de corriente de 500 uA, garantizando una mejora en el dolor y cicatrización de los tejidos [10], en conjunto con los estudios realizados por Guarín-Corredor et al (2013) donde revelan que con el empleo de la electroestimulación con frecuencias de 50 a 100Hz, impulsos de 100ms e intensidad de 3 mA, se logra el efecto electroquímico que favorece la cicatrización [11] y los estudios de Postigo (2013) donde concluyen que tiempos de impulso de 100 ms, con pausas 20 ms y frecuencia de 100Hz presentan mejores resultados en úlceras [12]. Por lo tanto, se tienen como características deseadas del sistema de electroterapia una frecuencia de impulso entre 5 a 10 Hz, con oscilaciones fijas en un valor comprendido entre 50 a 100 Hz, con pausas variables o ciclo de trabajo ajustable y una corriente de salida entre 0.5 y 3 mA.

2.1 Diseño del prototipo

Tomando como referencia la investigación teórica y a los antecedentes del tema, se comenzó el diseño del equipo; partiendo del objetivo de conseguir que el equipo fuera capaz de suministrar alrededor de 200 a 250 V de salida en corriente continua para así poder inducirla al cuerpo, además de controlar la señal de salida para manejarla pulsada y con ciclo de trabajo variable; por último, también es necesario crear un sistema de succión para lograr una zona de vacío en el área a tratar.

2.1.1 Electroestimulador

Para la creación de la electroestimulación, el primer paso a realizar es el diseño del circuito de control capaz de generar los pulsos de activación a una frecuencia de 5 a 10 Hz y controlar el ciclo de trabajo de los mismos para obtener pausas entre activaciones variables, para esto se empleó un circuito básico del integrado 555 en modo astable para variar la frecuencia además de la capacidad de cambiar el lapso de tiempo en el que queremos que la señal esté encendida y apagada o ciclo de trabajo, el circuito empleado se encuentra en la literatura de electrónica analógica [13]. En la Figura 1, se tiene el circuito construido, en él se cuentan con elementos fijos para obtener un pulso de 5Hz y un ciclo de trabajo del 65%, lo que se traduce con una activación de 65 ms por 35 ms de descanso. Sin embargo, en la aplicación práctica, los resistores R_1 y R_2, se sustituyen por potenciómetros para variar en un rango pequeño el pulso y el ciclo de trabajo para habilitar terapias diferentes. En la Figura 2, se muestra una gráfica de las señales obtenidas con el circuito oscilador, en pruebas para obtener una frecuencia de 5 Hz y diferentes ciclos de trabajo.

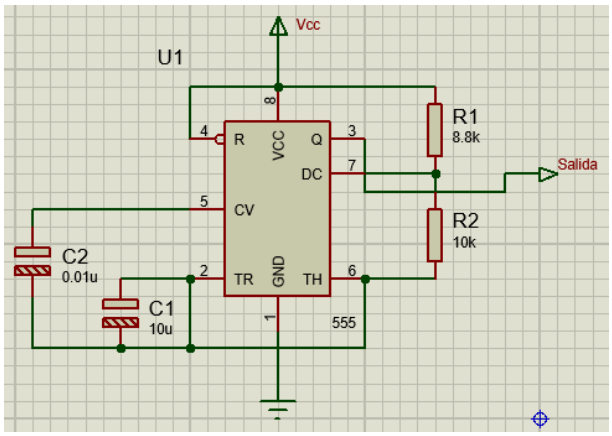


Figura 1. Oscilador 555 en modo astable obtenido de [13].

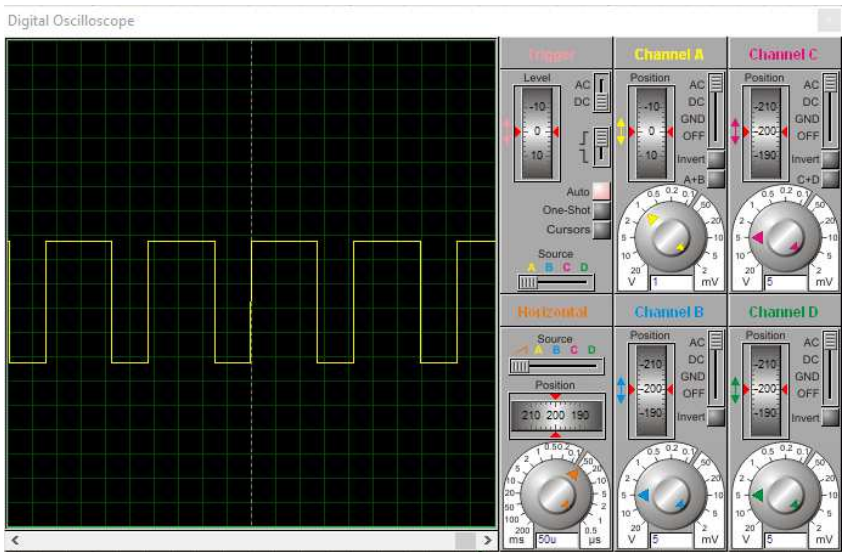


Figura 2. Gráfica de prueba para frecuencia de 5Hz y un ciclo de trabajo del 65%.

Una vez obtenida la señal de pulsos de activación, se procede al diseño de la señal pulsada de baja corriente eléctrica, la cual es la que se suministrará al cuerpo, de acuerdo a [10, 11] y [12] la corriente eléctrica deberá oscilar entre 500 uA y los 3 mA y deberá ser de una frecuencia fija

comprendida en el rango de 50 a 100 Hz, en este trabajo se optará por crear un transformador elevador de voltaje que permita tener una señal senoidal en 60 Hz a un voltaje de 200 a 250 V con una corriente en el rango deseado. Para lograr esto, se probó la relación de devanados mediante el uso del software Proteus, en el cual se realizaron pruebas con los devanados en un transformador de tal manera que proporcionará las especificaciones de amplitud de voltaje y corriente requeridas. En la Figura 3, se muestra el modelo del transformador en el software y la variación en los parámetros de devanados, para su futura construcción. Las especificaciones se consiguieron a prueba y error con el simulador.

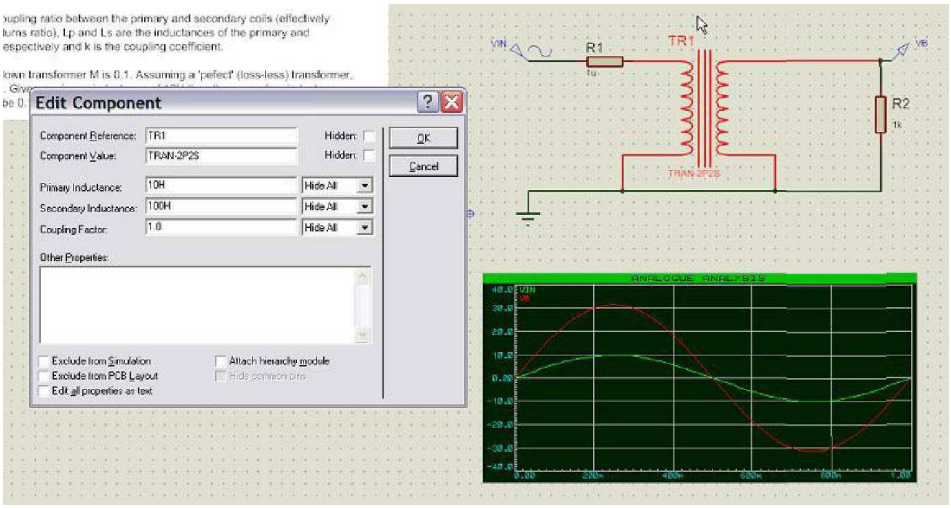


Figura 3. Modelo de transformador en el software Proteus.

En este momento, los dos componentes se tenían por separado, el primero genera los pulsos en los ciclos de trabajos necesarios, el segundo genera los altos voltajes y las bajas corrientes a una frecuencia de oscilación adecuadas para ser suministradas al cuerpo humano, el siguiente paso es proceder a juntar estos dos circuitos para que la señal de salida fuera una señal de alto voltaje, con microcorrientes, pulsante y con el ciclo de trabajo óptimo.

Al conjuntar los dos elementos, se procede a acoplarlos de forma que el circuito de control realizado con la configuración astable del circuito oscilador 555, active un circuito conmutador que permite la entrega de la señal emitida por el transformador, al cuerpo, predominando los pulsos negativos, esto con la finalidad de polarizar de forma negativa el área afectada de los pacientes, debido a que activa la cicatrización. Este acoplamiento de circuitos se puede apreciar en la Figura 4. La gráfica de salida del circuito acoplado se muestra en la Figura 5, en ella se puede observar la existencia de las oscilaciones durante el pulso de activación de la señal de control, mientras que en el apagado no hay oscilaciones, lo que permite una mejor excitación en el tejido.

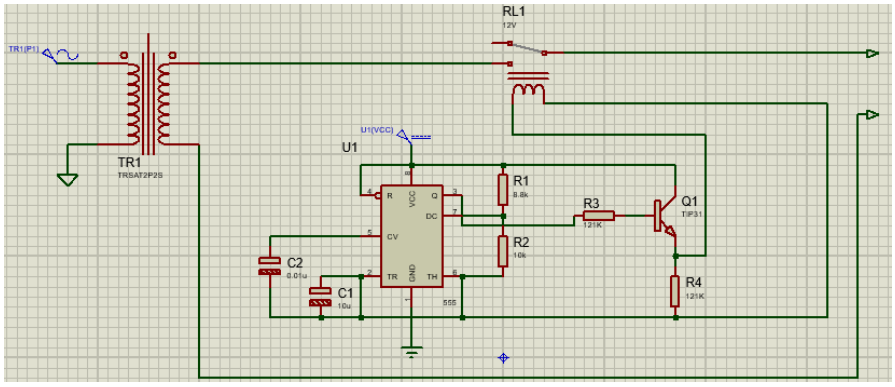


Figura 4. Circuito acoplado del transformador con el oscilador.

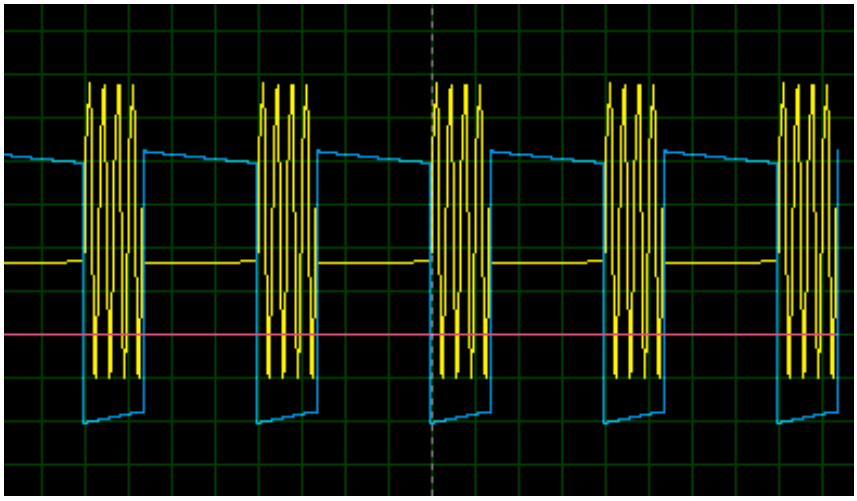


Figura 5. Señal de salida del circuito acoplado, usando los pulsos negativos para aplicar la oscilación.

2.1.2 Bomba de vacío

Para la parte de la presión negativa, se optó por utilizar un compresor de aire, conectado a un manómetro de presión, el cual se puede ajustar para suministrar al paciente una cantidad exacta de vacío de la herida, tal como se observa en la Figura 6. Teniendo así la seguridad de una sesión de VAC de vacío continúo por un tiempo prolongado. Se optó por utilizar un compresor modelo DISX 10, el cual genera una capacidad de vacío de hasta 20inHg, más que suficientes para el propósito de la terapia.

Para controlar la cantidad de succión, se implementó un regulador de vacío continuo 0-160 mmHg de aspiración, el cual tiene la capacidad de regular a bajo, mediano y alto nivel, hasta el vacío completo, con incrementos hasta 200 mmHg en el medidor. Dado que la terapia por presión negativa, recoge residuos de la herida, como lo son sangre, exudado, pus, entre otros. Es necesario utilizar un depósito estéril que resguarde estos, hasta su posterior desecho. Para resolver lo anterior se implementó un canister para aspiración, con soporte de 1.5 litros.

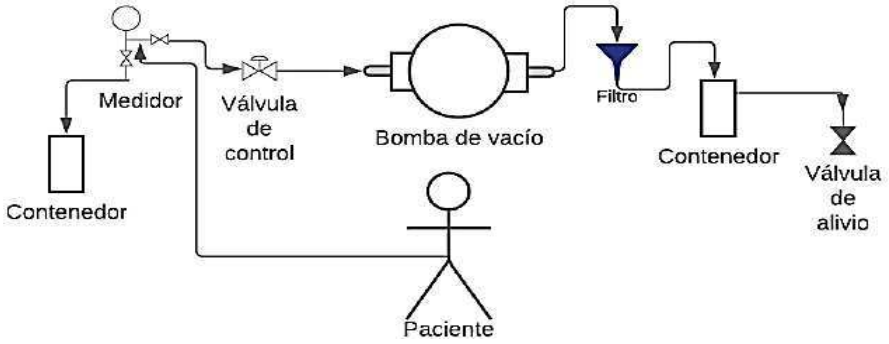


Figura 6. Diagrama de conexión de presión negativa.

2.2 Construcción del prototipo

Se inició con la construcción del generador de microcorriente, el cual consiste en un transformador de corriente capaz de generar 200V a la salida, con la peculiaridad de conservar una corriente eléctrica muy baja, en el rango de los microsamperes. Partiendo de conceptos teóricos y del diseño previamente concebido en una simulación de computadora, se construyó un transformador, a partir de alambre de cobre y placas metálicas como núcleo, el cual se muestra en la Figura 7a. Este

primer transformador, aunque rústico, fue capaz de otorgar 200V de salida con una corriente aproximada de 500 mA, sin embargo, existieron algunos problemas en la construcción para su posible uso, el primer problema fue su gran tamaño teniendo 22.5 cm de largo, 13.6 cm de ancho y 18 cm de alto, calentamiento excesivo y una corriente grande para la aplicación médica, aunque la impedancia de la piel la atenúa podría existir un choque eléctrico con los 500 mA que entrega el transformador. Por lo cual se optó por construir uno nuevo, empleando un núcleo de hierro, mostrado en la Figura 7b. Este transformador, mucho más pequeño dando 10 cm de largo, 10 cm de ancho y 8 cm de alto, y más ligero que el anterior, es capaz de otorgar hasta 250V a la salida con una corriente de hasta 10 mA, la cual sigue siendo mayor a la deseada pero aún se encuentra en los límites teóricos de aplicación.

Figura 7. Transformadores diseñados para la electroestimulación. a) Ejemplo 1. b) Ejemplo 2.

De igual forma, para el circuito de control se procedió a realizar el diseño de placa PCB, Figura 8, para integrar los componentes electrónicos y lograr manipular la señal eléctrica del transformador de corriente para convertirla en pulsos, este PCB se tomó como base al circuito de la Figura 4. Como anteriormente se indicó, las resistencias R_1 y R_2 fueron cambiadas por potenciómetros para poder manipular el ciclo de trabajo y los pulsos de activación de acuerdo al caso en el que se puede aplicar.

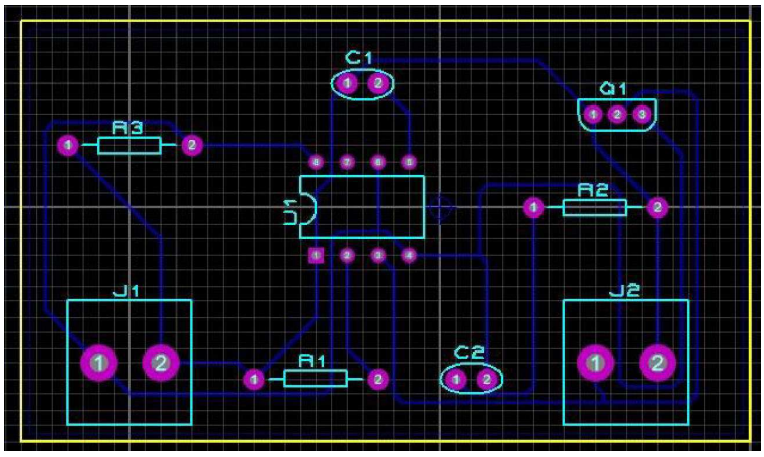


Figura 8. Diseño del PCB del circuito oscilador.

La segunda parte del sistema es lograr la generación de vacío en la herida, lo cual es la actividad objetivo de la terapia por presión negativa, por lo tanto, es indispensable implementar una succión continua de aire con una presión controlada, para esto se modificó un compresor de aire hidráulico modelo DISX 10 capaz de generar una presión de hasta -120 mmHg suficientes para la correcta práctica de la terapia. El compresor se conectó de manera inversa a una válvula de control de graduación de

vacío médico de la marca INFRA que garantiza la graduación exacta del flujo de aire hacia la cámara, además se implementó a un medidor regulador de vacío continuo marca OHIO MEDICAL, el cual, además de realizar la medición cuenta con un filtro para evitar el paso de residuos hacia la cámara del compresor. Por último, se agregó un contenedor de residuos biológicos peligrosos e infecciosos (RPBI) canister CLINIMARK, el cual contiene una bolsa para el almacenamiento de todos los residuos generados al aplicar el procedimiento.

Como medida de seguridad y para el buen funcionamiento del compresor, se implementó también un contenedor de residuos de aceite, ya que este se expulsa como un resultado del empuje de aire dentro de la cámara del motor. Anterior a este se conectó un filtro pequeño de moto conectado por una manguera de calibre 6 mm x 8 mm. En la Figura 9, se muestra un diagrama de flujo de la conexión de la parte de presión negativa en el prototipo, con la finalidad de mostrar la conexión entre cada etapa del proceso.

Figura 9. Diagrama de la conexión física de los componentes de la bomba de vacío en base al diseño propio obtenido de la investigación.

2.3 Control y rutinas

Hasta este momento el prototipo realiza las funciones deseadas de la electroterapia y la aplicación de presión negativa, sin embargo, su funcionamiento es manual, por lo que requiere que tenga un supervisor en todo momento, para evitar esto, se diseñan rutinas implementadas en un microcontrolador para que active la electroterapia durante un tiempo y la aplicación de la presión negativa, en función a los procesos de la aplicación de la terapia.

Primeramente, se establecen las funciones deseadas, estas son: establecer tiempos de aplicación de las rutinas de electroterapia y presión negativa, activación y desactivación de cada elemento en la secuencia de la terapia, visualización del tiempo faltante de terapia, alarmas de fin de terapia, entre otras lecturas de interés del usuario. Para lograr la visualización de información se implementó una pantalla LCD de 16x2, donde se distribuyen los mensajes de bienvenida y las indicaciones al usuario para que seleccione el tiempo de ejecución de la terapia y la inicie, esta pantalla es controlada por un microcontrolador ATmega328p de la tarjeta de desarrollo Arduino, además de controlar la pantalla, el microcontrolador se utiliza para mandar las señales de activación y desactivación de elementos, así como llevar el tiempo de la terapia, además activa una alarma sonora que indica que la sesión de terapia ha concluido.

A continuación, en la Figura 10, se presenta el diseño de conexión de un display LCD, así como de la alarma sonora y la etapa de control de la bomba de vacío, la cual, para fines ilustrativos fue sustituida por una bombilla eléctrica de 120V. El circuito se divide en tres etapas, las cuales son:

1. Etapa de control de tiempo
2. Etapa de control de bomba de vacío
3. Etapa de visualización de usuario

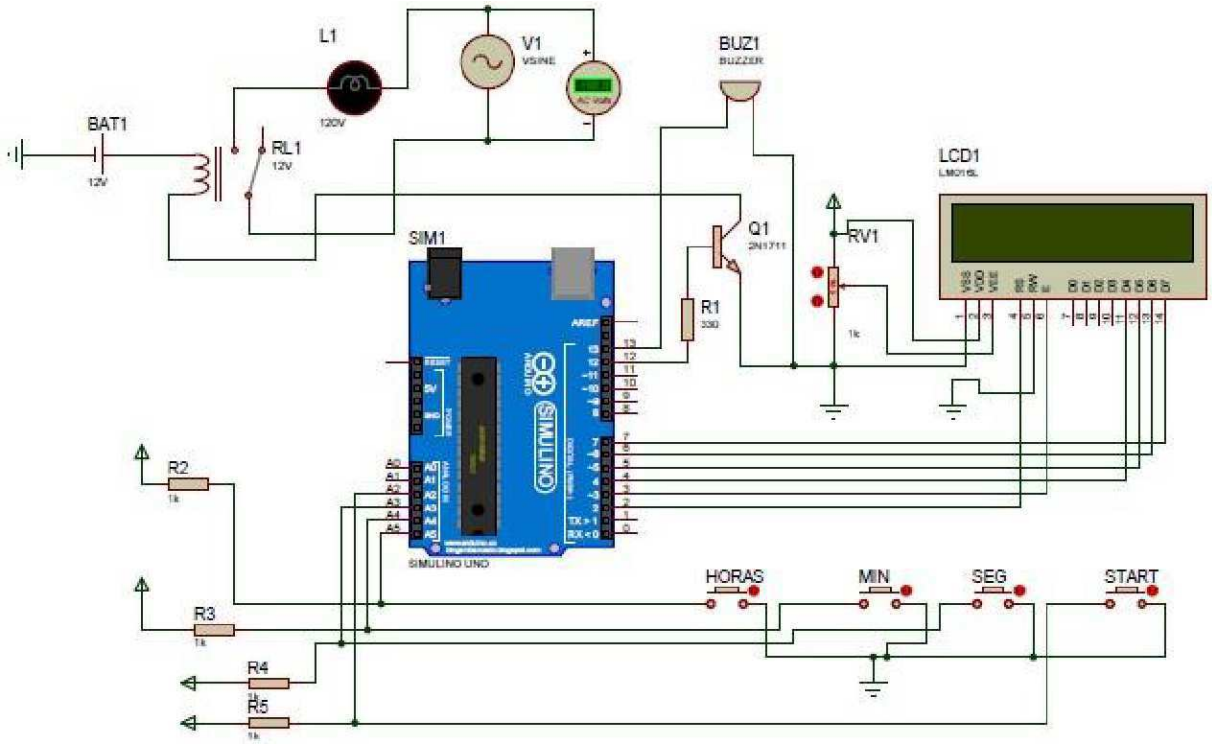


Figura 10. Circuito de control y muestra de parámetros.

La primera etapa consta de un sistema de control de tres botones de tiempo los cuales tienen la función de incrementar la cantidad de horas, minutos y segundos respectivamente, así como un cuarto botón marcado como “Start” que, al ser presionado, acciona el arranque del temporizador y el encendido de la bomba de vacío con un tiempo de aplicación igual al marcado por el usuario.

La segunda etapa consiste en el control del encendido y apagado de la bomba de vacío, siendo activada por medio de un pulso desde el microcontrolador Arduino, hasta el disparador de un relevador, que libera el paso de la energía eléctrica de la toma de luz hacia la bomba de vacío. De igual forma se activa la electroterapia, mandando una señal de alimentación al circuito que prevé la señal analógica adaptada para el usuario.

En la tercera y última etapa, se tiene la visualización del usuario, en esta se muestra la información para el usuario del prototipo médico, en la cual en primera instancia se muestra un mensaje de bienvenida, inmediatamente después se despliega un menú para seleccionar el tiempo de duración de la terapia, una vez determinado este tiempo y presionado el botón de “start” comienza la cuenta regresiva de la terapia, mostrándose la misma durante toda la terapia en el display LCD. Al finalizar el tiempo, se muestra un mensaje de “Terapia Finalizada” al mismo tiempo se activa un buzzer indicando el apagado de la bomba de vacío.

2.3.1 Programación

La programación del circuito de control, se diseñó un código capaz de controlar una pantalla LCD para mostrar mensajes de bienvenida, así como un menú de selección de tiempo accionado por medio de botones físicos. También por medio de la programación se controla la acción de encendido y apagado de una bomba de vacío y un buzzer que indica el término de la terapia.

Para mayor compresión del código, la Figura 11 muestra un diagrama de flujo que explica el funcionamiento básico de la programación. Como se puede observar en el diagrama de flujo, la programación inicia con un mensaje de bienvenida en la pantalla LCD, el cual es: “Terapia VAC Microcorriente”, después de esto, automáticamente se procede a entrar al menú de selección de tiempo de terapia, el cual es un temporizador de horas, minutos y segundos. Es aquí donde se seleccionará el tiempo necesario para la terapia. Una vez seleccionado el tiempo exacto, se deberá accionar el botón de “start” el cual arranca el temporizador y a su vez da la indicación de activar un relay de 12v el cual abrirá una puerta electrónica para ceder el paso de energía hacia el compresor y así iniciar la terapia de vacío.

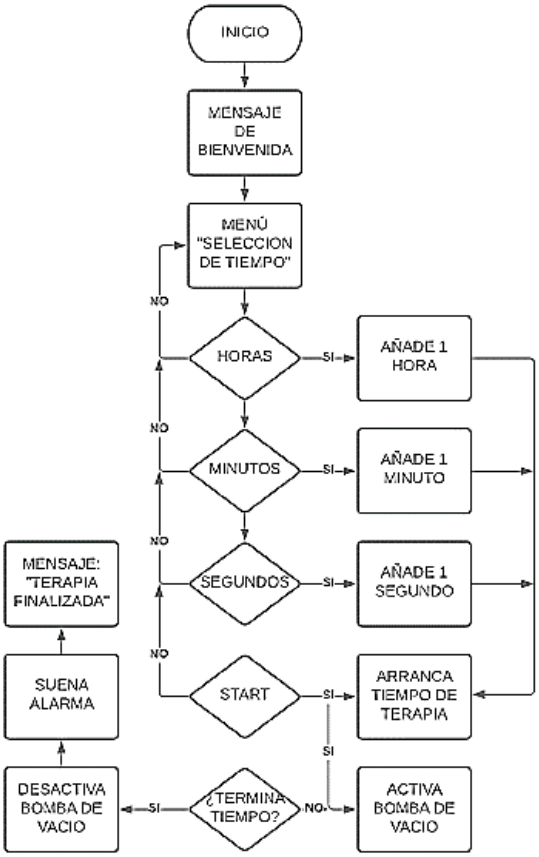


Figura 11. Diagrama de flujo de la programación de rutinas sobre la placa de desarrollo Arduino.

Una vez concluido el tiempo en el temporizador, automáticamente se cerrará la puerta electrónica del relevador y se desenergizará el compresor, mostrando un mensaje de “Terapia Finalizada” y haciendo sonar un pequeño buzzer a manera de alerta al usuario de que la terapia terminó.

3. Resultados

El diseño final del prototipo médico se realizó a partir del cascarón de una UPS, la cual fungió como carcasa para todos los implementos antes mencionados. En esta se montó el regulador de vacío exterior, el canister para almacenamiento de residuos y el ventilador de enfriamiento interno. A continuación, en la Figura 12, se muestran las imágenes del resultado final de la construcción del prototipo.

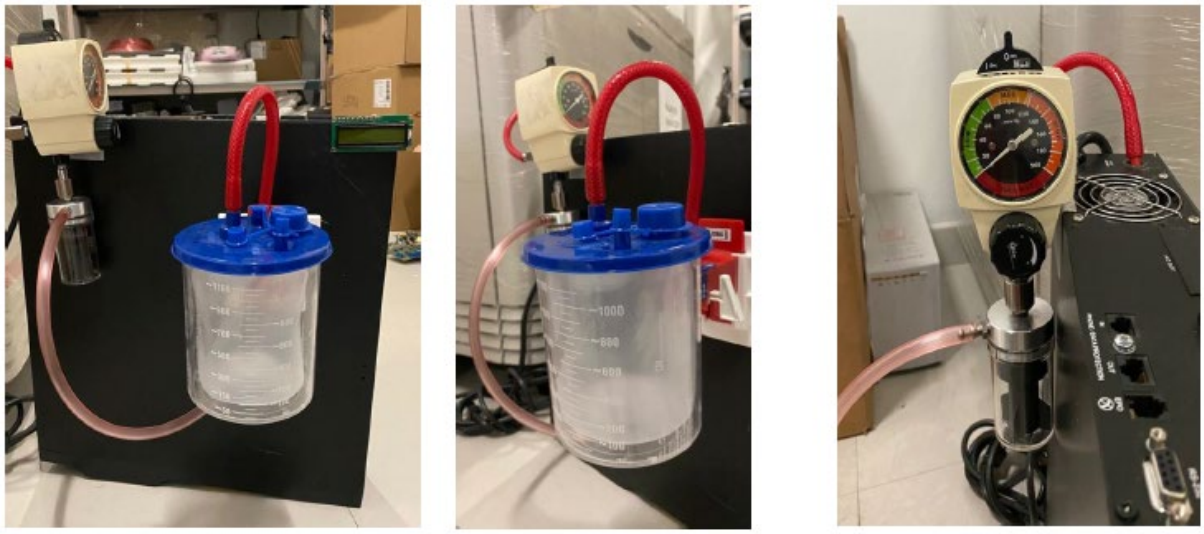


Figura 12. Diseño final del prototipo.

Dado que la base teórica y práctica del prototipo es una técnica nueva que combina terapias que en tratamientos médicos se implementan por separado, actualmente no existe ningún documento médico, estudio o investigación que describa la eficacia y/o los riesgos de utilizar las terapias simultáneamente, debido a esto y a las implicaciones éticas que se generan al experimentar con pacientes, lo primero que se optó por realizar fue la implementación de estas dos técnicas al mismo tiempo con los equipos existentes en el mercado para cada una de ellas.

Se realizó un estudio piloto controlado y confidencial dentro de una clínica privada, para observar la interacción de la aplicación de los dos métodos, electroterapia y presión negativa, en conjunto, el estudio fue aprobado por el Comité de Ética de la clínica y con firma del consentimiento por todas las personas que intervienen en el mismo. En este estudio se empleó equipo médico certificado para la aplicación de microcorriente se utilizó un electroestimulador de la marca Beurer y para la terapia de presión negativa un equipo VAC de la marca 3M. Principalmente, se realizó para verificar si es probable que exista un beneficio verdadero de combinar ambas técnicas y determinar si se encuentra algún riesgo. Realizadas las pruebas por médicos calificados, se comprobó que no existe interacción negativa o evidencia de algún daño a los usuarios.

Así mismo, el estudio piloto, tiene el protocolo de aplicación de la técnica experimental del uso de la terapia de presión negativa en combinación con electroestimulación como una forma alternativa para la asistencia en curación y cicatrización para úlceras neuroisquémicas de pie diabético. El ensayo establece la selección de individuos de ambos los sexos, con edad superior a los 30 años, con diagnóstico clínico de úlcera diabética en miembros inferiores, sedentarios, y bajo tratamiento basado en curativos simples, se excluyen individuos con marcapasos, hipertensión arterial sistémica no controlada, personas que hiciesen uso de métodos compresivos, medicamentos orales o tópicos que actuasen directamente en el proceso de cicatrización o uso de analgésicos durante el período de intervención.

Para llevar a cabo las respectivas pruebas experimentales del prototipo médico, para el tratamiento alternativo de las úlceras por medio de la aplicación de presión negativa y microcorriente a la herida, se realizó una simulación de una situación real, en la que se solicitó a un sujeto de prueba sano, sin problema alguno, que se sometiera a la aplicación del prototipo para realizar la demostración del uso y tratamiento con la finalidad de verificar el procedimiento y recolectar datos de la aplicación del prototipo desarrollado. La experimentación consta de simples pasos a seguir los cuales se mencionan a continuación de manera clara y concisa, con material fotográfico incluido, tómese en consideración que las pruebas realizadas fueron bajo la supervisión de médicos certificados y en instalaciones clínicas.

El primer paso consta de verificar que se cuenta con todo el material necesario para la aplicación de la terapia con el equipo médico, el cual, consta de:

1. Cinta adhesiva de tela
2. Alcohol o Exgerm para limpiar la zona
3. Toallas para limpiar la zona
4. Espuma hipoalergénica para uso en terapia VAC
5. Apósito para aislar la zona de la herida
6. Y electrodos desechables para proporcionar la corriente

El segundo paso consta de colocar al paciente que tomará la terapia en una posición cómoda, de preferencia acostado o en su defecto sentado. Posteriormente descubrir la zona donde se aplicará la terapia. El tercer paso es, preparar la zona de la herida, limpiando la misma con alcohol o Exgerm para remover grasa y suciedad que pudiera entorpecer la conductividad de la corriente eléctrica suministrada. Aunado a esto, es necesario recortar la espuma al tamaño y forma exacta de la herida que presente el paciente. Una vez con esto listo, se coloca la espuma en el área afectada, los electrodos se colocan alrededor de la misma y se envuelve todo con un apósito de plástico que ayudará a crear un ambiente sellado para el vacío proporcionado por el compresor. Como se puede observar en la Figura 13, una vez colocado la espuma y el apósito, se coloca la manguera que comenzara a realizar la succión del aire dentro de la herida.

Figura 13. Colocación de la espuma y el apósito.

Una vez que todo se encuentra limpio y colocado en su posición, se enciende el equipo que instantáneamente reproducirá un sonido indicando que el transformador esté encendido. Al mismo tiempo, el compresor comienza a trabajar, se necesitan aproximadamente tres minutos para que este logre el vacío en su interior y así comenzar a succionar.

En la Figura 14, el regulador de vacío que se puede observar colocado en la parte posterior del equipo, se activa con una perilla en la parte de arriba, que indica tres posiciones, ON; OFF; Vacío total. Además, cuenta con una perilla reguladora, con la que se puede controlar la cantidad de mmHg (milímetros de mercurio) que se desean suministrar. El recipiente con la tapadera azul, es un canister que recoge los fluidos extraídos de la herida, tales como pus, sangre, tejido necrótico, entre otros que pudieran surgir de la úlcera.

Figura 14. Prototipo conectado al paciente.

Como resultados cualitativos se obtuvo un prototipo funcional que ejecuta rutinas de electroterapia y presión negativas con características semejantes a las indicadas en trabajos de investigación que son básicos para la fabricación de equipos certificados. Como datos cuantitativos se obtuvieron mediciones sobre los parámetros eléctricos del funcionamiento del equipo de electroterapia, mediciones de presiones en el sistema de presión negativa, además de mediciones de corrientes en usuario. Por la etapa de maduración del prototipo aún no se han desarrollado pruebas en pacientes con la problemática real, sin embargo, el protocolo de ensayo clínico en pacientes se encuentra desarrollado en su totalidad y en revisión para su posible implementación. La Tabla 1 muestra los datos relevantes obtenidos hasta el momento.

Tabla 1. Datos obtenidos en pruebas realizadas.

Electroterapia				
Frecuencia de oscilación 60 Hz	Frecuencia de pulso 4.2 a 9.7 Hz	Ciclo de trabajo 37 a 76 %	Voltaje máximo 246.3 V	Corriente máxima sobre usuario 4.6 mA

Presión negativa	
Presión máxima generada	-118 mmHg

4. Conclusiones

Después de revisar la información recabada de múltiples artículos científicos, investigaciones médicas entre otras, se observó la relevancia actual que plantea el uso de tecnologías y terapias alternativas para la regeneración de la piel y curación de heridas crónica, resultó de gran interés el uso en específico de la presión tópica negativa dados sus múltiples avances en el ámbito de la medicina regenerativa y resultados favorables en el tratamiento de estas lesiones. De igual forma, llamó nuestra atención el uso de la electroestimulación aplicada a heridas crónicas, por sus resultados favorables en una extensa lista de experimentos realizados con pacientes tanto humanos como animales.

Con respecto a los resultados se puede establecer que existir una relación entre ambas técnicas, ya que una de ellas (la terapia de presión negativa), ataca a nivel físico y proporciona un ambiente húmedo en la herida lo que da pauta a la introducción en conjunto de la microcorriente que afecta principalmente a nivel celular y que aprovecha el ambiente húmedo de la herida para la disminución de la impedancia natural de la piel y así generar el mejor flujo de las corrientes exógenas.

En cuanto al trabajo a futuro, una de las mejoras en el proyecto sería la integración de un sistema para desechar el material extraído de la herida, como se sabe, cuando una persona presenta una úlcera de nivel avanzado, esta contiene fluidos no deseados, que, al ser aplicada la presión negativa, se extraen del área, como lo son el pus, tejido necrótico, sangre, etc. Es por esto que se presenta la idea de integrar una bolsa para recaudar todos estos residuos tal y como se hace en las maquinas profesionales de asistencia VAC®.

Se espera realizar una colaboración con compañeros de ingeniería química, con el propósito de desarrollar una esponja que pueda sustituir a las ya usadas en la terapia VAC®, la cual deberá contar con una estructura idónea para la biocompatibilidad con la piel de la herida y que sea de un material económico.

Referencias

[1] Arenas, J. (2003). Las heridas y su cicatrización. Elsevier-Offarm, 126-132.
[2] Tortora, J., & Derrickson, B. (2006). Principios de Anatomía y Fisiología 13.a Edición. México: Médica Panamericana.
[3] Berral, F., & Rodríguez, E. (2007). Impedancia bioeléctrica y su aplicación en el ámbito hospitalario. Rev Hosp Jua Mex , 104-112.
[4] Guarín-Corredor, C., Quiroga-Santamaría, P., & Landínez-Parra, N. (2013). Proceso de Cicatrización de heridas de piel, campos endógenos y su relación con las heridas crónicas. Rev. Fac. Med., 441-448.
[5] Owoeye I, S. N. (1987). Low- intensity pulsed galvanic current and the healding of tenotomized rat Achilles tendons: preliminary report using load-to-breaking measurements. Arch Phys Med Rehabil, 415-418.
[6] Balcavage WX, A. T. (1996). A mechanism for action of extremely low frequency electromagnetic fields on biological systems. Biochem Biophys Res Commun, 374-378.
[7] Reich D, T. P. (1990). Electrical Stimulation of Skin. International Journal of Dermatology, 395-400.
[8] Argenta LC, M. M. (1997). Vacuum-assisted Closure: A New Method for Wound Control and Treatment: Clinical Experience. Ann Plast Surg, 563-576.
[9] Najarro, F., Luanco, A., Jiménez, A., & Sicre, M. (2014). Terapia por presión negativa en el manejo de heridas complejas en traumatología. Innovación e indicación. Rev. S. And. Traum. y Ort., 17-23.
[10] Guarda, R., Valderramas, S., Ternoski, B., Sanches, D., Fernandes, L., & Meireles, S. (2012). La aplicación de microcorriente como tratamiento en las úlceras venosas: un estudio piloto. Revista Latino-Americana de Enfermagem, 753-760.
[11] Guarín-Corredor, Claribeth, Paola Quiroga-Santamaría, and Nancy Stella Landínez-Parra. "Proceso de Cicatrización de heridas de piel, campos endógenos y su relación con las heridas crónicas." Revista de la Facultad de Medicina 61.4 (2013): 441-448.
[12] Postigo Navarro, S; Rivera Puerta, F. Innovación en cuidados de úlceras por presión: Aplicación de electroterapia. ROL Enferm. 2013; 36(2): 60-64
[13] Malvino, Albert P. (1998). Principios de electrónica (5a. ed.). Madrid: McGraw-Hill Interamericana.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 3, pp. 32 – 44
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Prototipo de pierna de robot basada en el mecanismo Evans 2

Alcacio Prieto Israel, Núñez Altamirano Diego Alfredo, Monreal Carbajal Carlos Jesús E., Torres del Carmen Felipe J., Ramírez Paredes Juan P.

Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca
da.nunez@ugto.mx

Resumen

En este trabajo se presenta el prototipo de una unidad de propulsión para máquinas caminantes basada en el mecanismo plano Evans 2, se comienza desarrollando el análisis cinemático del mecanismo que permite determinar la trayectoria que genera, posteriormente se aborda la concepción de la transformación del mecanismo en una pierna robótica, para posteriormente presentar el diseño conceptual hasta llegar a la presentación del prototipo fabricado empleando manufactura aditiva. El análisis cinemático permite encontrar las trayectorias, velocidades y aceleraciones que tendría el segmento que funciona como pie. Esto permite determinar que es posible generar una unidad de propulsión basada en mecanismos planos que al ser modificada se pueda desplazar en el espacio, esto se corrobora al crear un prototipo impreso en 3D.

Palabras clave: Pierna de robot, Mecanismo de Evans, Cinemática, Manufactura aditiva, Prototipo, simulación.

1. Introducción

En los últimos años la investigación en el área de robótica móvil ha incrementado gracias al desarrollo tecnológico, como resultado se han desarrollado diferentes tipos y arquitecturas de unidades de propulsión para máquinas caminantes. Sin embargo, existen múltiples configuraciones por desarrollar, en este caso se busca aplicar un mecanismo de trayectoria específica como base de unidades de propulsión que permitan reducir el número de actuadores por extremidad y pueda emplearse en diversas aplicaciones.

Las máquinas caminantes emplean diferentes tipos de sistemas de propulsión y un gran número de ellos se basan en estructuras clásicas que emplean al menos 3 grados de libertad (GDL) para desplazarse en el espacio, algunos ejemplos son las configuraciones RRR [1], [2], configuraciones tipo SCARA [3] y configuraciones bioinspiradas [4], [5]. En los últimos años han tenido un gran auge el uso de mecanismos paralelos en el diseño de robots [6], [7], algunos de ellos son empleados en el cuidado y traslado de personas [8], [9].

Una de las principales ventaja de los robots caminantes, respecto a los que emplean ruedas, es que su capacidad de adaptarse a terrenos no estructurados les permite caminar sobre casi cualquier superficie [10]; a pesar de que la gran mayoría de las extremidades de los robot caminantes emplean 3 GDL, existen algunas configuraciones de máquinas caminantes que emplean menos GDL, como el caso del robot cuadrúpedo presentado en [11] que emplea 2 GDL por extremidad o el robot bípedo que emplea solamente 1 GDL para desplazarse [12], sin embargo, el reducir GDL en las extremidades puede limitar la movilidad y estabilidad de los robots.

Una parte interesante de las configuraciones de las extremidades de los robots caminantes es el uso de mecanismos reconfigurables, estos permiten configurar las extremidades para que se adapten

a diferentes terrenos o trayectorias. Existen robots caminantes que emplean mecanismos paralelos que son capaces de reconfigurarse para reducir su número de extremidades para poder subir escalones [13]. El uso de mecanismos planos aplicado a máquinas caminantes hexápodas permite convertir pequeños movimientos de entrada en grandes movimientos de salida [14], también existen unidades de propulsión basadas en mecanismos más simples como la plataforma Jansen reconfigurable [15], basada en un mecanismo plano de 1 GDL, que permite describir diversas trayectorias y el robot reconfigurable en el que sus extremidades emplean un mecanismo reconfigurable, que le permite modificar su trayectoria de movimiento al transformar la forma de sus eslabones [16].

El uso de mecanismos planos de trayectoria aproximada en el desarrollo de unidades de propulsión para máquinas caminantes no ha sido estudiado con mucha amplitud y existen mecanismos que tiene un gran potencial para ser empleados como unidades de propulsión aprovechando la capacidad del mecanismo de describir trayectorias específicas, esto permitiría reducir el número de actuadores empleados por extremidad, lo que podría verse reflejado en un menor consumo de energía y un control más simple.

En este estudio se presenta el análisis cinemático directo, el diseño de la unidad de propulsión y el prototipado de la misma que será empleada en un robot cuadrúpedo. La unidad de propulsión presentada se basa en el mecanismo plano de Evans 2.

2. Análisis de la unidad de propulsión

Para generar la unidad de propulsión que se basa en el mecanismo de Evans 2 se siguieron una serie de pasos que serán descritos a continuación, se inicia con una introducción al mecanismo empleado, posteriormente se presenta el análisis cinemático del mecanismo y por último se presenta el diseño conceptual de la unidad de propulsión.

2.1 Mecanismo Evans 2

El mecanismo de Evans 2 es un mecanismo plano de cuatro barras que cuenta con cuatro articulaciones rotacionales y tiene un grado de libertad. El mecanismo describe una trayectoria con el punto P en la que un segmento es una recta aproximada, como se muestra en la figura 1. Este mecanismo tiene una variable angular de entrada θ_2 y para el rango de $-34° \leq \theta_2 \leq 34°$ la trayectoria descrita por el punto P es una recta aproximada.

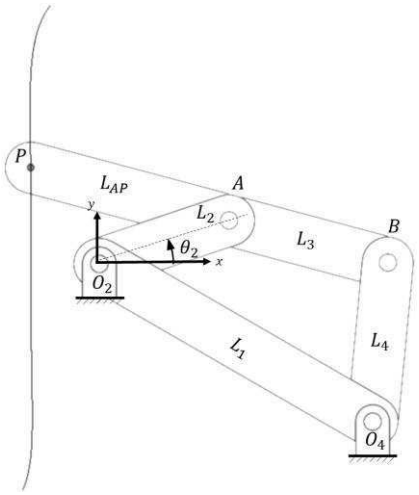


Figura 1. Mecanismo de Evans 2.

En la figura 1 se muestran los elementos que conforman al mecanismo y se pueden apreciar las cuatro articulaciones rotacionales O_2, O_4, A y B, las articulaciones O_2 y O_4 son fijas. Las longitudes L_1, L_2, L_3 , L_4 y L_{AP} de los eslabones miden la distancia entre los centros de las articulaciones o puntos de interés. La descripción de las longitudes de los eslabones se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de las longitudes de los eslabones.

Símbolos	Descripción
L_1	Distancia entre las articulaciones O_2 y O_4.
L_2	Distancia entre las articulaciones O_2 y A.
L_3	Distancia entre las articulaciones A y B.
L_4	Distancia entre las articulaciones O_4 y B.
L_{AP}	Distancia entre la articulación A y el punto P.

En la figura 1 se muestran los elementos que conforman al mecanismo y se pueden apreciar las cuatro articulaciones rotacionales O_2, O_4, A y B, las articulaciones O_2 y O_4 son fijas. Las longitudes L_1, L_2, L_3 , L_4 y L_{AP} de los eslabones miden la distancia entre los centros de las articulaciones o puntos de interés. La descripción de las longitudes de los eslabones se presenta en la Tabla 1.

Para que el mecanismo pueda describir esta trayectoria se deben cumplir ciertas relaciones entre las longitudes de los eslabones [17], estás longitudes se encuentran en función del parámetro L y son: $L_1 = 2.305 * L$, $L_2 = L$, $L_3 = 1.2 * L$, $L_4 = 1.167 * L$ y $L_{AP} = 1.5 * L$. El eslabón 1, cuya longitud es L_1, se define su orientación por un ángulo fijo de 330°. Con estas relaciones se asegura que el punto P describa la trayectoria deseada y la longitud del segmento recto es equivalente a $2.5 * L$ aproximadamente. En la figura 2 se muestra la longitud del segmento de la recta para el rango $-34° \leq \theta_2 \leq 34°$.

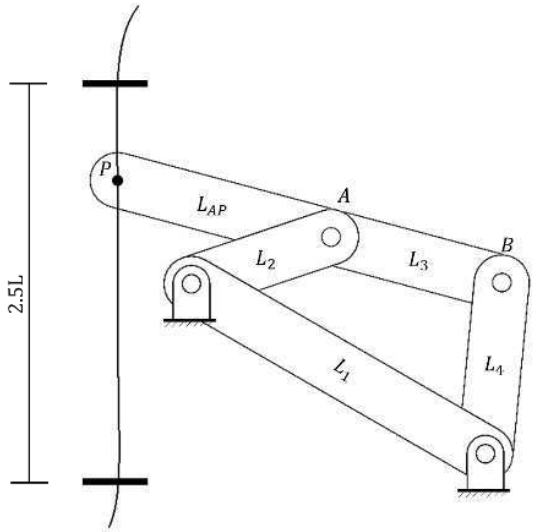


Figura 2. Longitud de la trayectoria recta trazada por el punto P.

2.2 Análisis cinemático

Para determinar la posición, velocidad y aceleración de cualquier elemento del mecanismo se resuelve la cinemática mediante las ecuaciones vectoriales de lazo cerrado. En la figura 3 se muestra

el lazo vectorial y los ángulos empleados, es importante mencionar que los ángulos se miden de forma absoluta respecto al eje x positivo empleando la regla de la mano derecha. En la Tabla 2 se define a los vectores que forman el lazo cerrado.

Tabla 2. Descripción de los vectores que componen al lazo vectorial.

Vectores	Descripción
$\vec{r}_1$	Se dirige de la articulación O_2 a la O_4.
$\vec{r}_2$	Se dirige de la articulación O_2 a la A.
$\vec{r}_3$	Se dirige de la articulación B a la A.
$\vec{r}_4$	Se dirige de la articulación O_4 a la B.

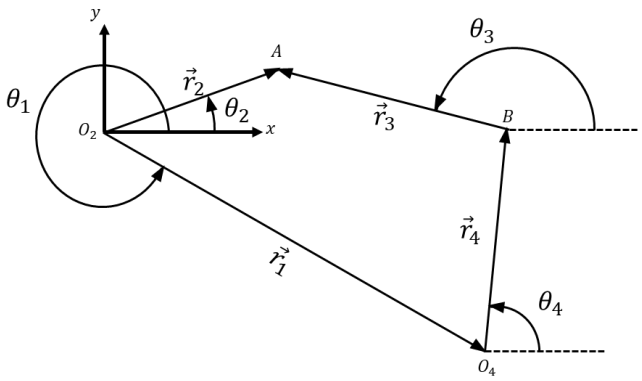


Figura 3. Lazo vectorial y ángulos de referencia.

Para iniciar con la solución de la cinemática del lazo cerrado mostrado en la figura 3, se inicia resolviendo el análisis de posición. La ecuación (1) representa el lazo vectorial cerrado formado en el mecanismo.

$$\vec{r}_1 + \vec{r}_4 + \vec{r}_3 - \vec{r}_2 = 0 \tag{1}$$

Al ser un mecanismo plano la ecuación (1) puede escribirse de forma escalar separando sus componentes, las ecuaciones (2) y (3) muestran los componentes x y los componentes y, respectivamente.

$$L_1 cos\theta_1 + L_4 cos\theta_4 + L_3 cos\theta_3 - L_2 cos\theta_2 = 0 \tag{2}$$

$$L_1 sin\theta_1 + L_4 sin\theta_4 + L_3 sin\theta_3 - L_2 sin\theta_2 = 0 \tag{3}$$

Para la solución de las ecuaciones (2) y (3) se debe tener en cuenta que se conocen las longitudes de los eslabones y que estos son considerados como cuerpos rígidos, por lo tanto, son constantes, también se conoce el ángulo θ_1 y se debe conocer el valor de la variable de entrada θ_2. Como se aprecia se cuenta con 2 ecuaciones y dos incógnitas que son θ_3 y θ_4, por lo que se puede resolver el análisis de posición.

Antes de iniciar el análisis de velocidad se debe tener resuelto el análisis de posición. Para el análisis de velocidad se derivan las ecuaciones escalares (2) y (3) y se obtienen las ecuaciones (4) y (5), en donde ω_3 y ω_4 son las velocidades angulares de los eslabones 3 y 4 respectivamente, estas

velocidades angulares serán las dos incógnitas. En este caso, se parte de que conocemos la velocidad angular ω_2 ya que es una variable de entrada.

$$-L_4\omega_4 sin\theta_4 - L_3\omega_3 sin\theta_3 + L_2\omega_2 sin\theta_2 = 0 \quad (4)$$

$$L_4\omega_4 cos\theta_4 + L_3\omega_3 cos\theta_3 - L_2\omega_2 cos\theta_2 = 0 \quad (5)$$

Antes del análisis de aceleración se debe tener resuelto el análisis de velocidad. Para el análisis de aceleración se derivan las ecuaciones escalares (4) y (5) y se obtienen las ecuaciones (6) y (7), en donde α_3 y α_4 son las aceleraciones angulares de los eslabones 3 y 4 respectivamente, estas aceleraciones angulares serán las dos incógnitas. En este caso, se debe conocer a la aceleración angular α_2 ya que es una variable de entrada. En las ecuaciones (6) y (7) se puede observar que las aceleraciones en los eslabones tienen componentes normales y tangenciales.

$$-L_4(\alpha_4 sin\theta_4 + \omega_4^2 cos\theta_4) - L_3(\alpha_3 sin\theta_3 + \omega_3^2 cos\theta_3) + L_2(\alpha_2 sin\theta_2 + \omega_2^2 cos\theta_2) = 0 \quad (6)$$

$$L_4(\alpha_4 cos\theta_4 - \omega_4^2 sin\theta_4) + L_3(\alpha_3 cos\theta_3 - \omega_3^2 sin\theta_3) - L_2(\alpha_2 cos\theta_2 - \omega_2^2 sin\theta_2) = 0 \quad (7)$$

Para encontrar los ángulos θ_3 y θ_4 se resuelve el sistema de ecuaciones no lineales conformado por las ecuaciones (2) y (3) para cada uno de los valores de θ_2.

Para encontrar las velocidades angulares ω_3 y ω_4, así como las aceleraciones angulares α_3 y α_4, se resuelven los sistemas de ecuaciones lineales conformado por las ecuaciones (4) y (5) y las ecuaciones (6) y (7), respectivamente, para cada uno de los valores de entrada θ_2, ω_2 y α_2, así como las variables angulares obtenidas al resolver el análisis de posición y velocidad.

Una vez resuelto el análisis de posición, velocidad y aceleración para el lazo cerrado establecido, se debe conocer la posición, velocidad y aceleración lineal del punto P del mecanismo empleando las ecuaciones (8), (9) y (10), respectivamente. Donde $r_{P/A}$ es el vector P visto desde A.

$$\vec{r}_P = \vec{r}_2 + \vec{r}_{\frac{P}{A}} \quad (8)$$

$$\vec{v}_P = \vec{\omega}_2 \times \vec{r}_2 + \vec{\omega}_3 \times \vec{r}_{P/A} \quad (9)$$

$$\vec{\alpha}_P = \vec{\alpha}_2 \times \vec{r}_2 + \vec{\omega}_2 \times \vec{\omega}_2 \times \vec{r}_2 \times + \vec{\alpha}_3 \times \vec{r}_{P/A} + \vec{\omega}_3 \times \vec{\omega}_3 \times \vec{r}_{P/A} \quad (10)$$

3. Diseño de las unidades de propulsión

Para diseñar las unidades de propulsión se usó la herramienta CAD de Autodesk Inventor, así como para la simulación. Para la parte del prototipado se crearon las piezas mediante manufactura aditiva, empleando una impresora Ultimaker 2+.

3.1 Concepción de la unidad de propulsión reconfigurable

Como se menciona al inicio de este artículo, las unidades de propulsión del robot cuadrúpedo se basan en el mecanismo de Evans 2 de 1 GDL, aprovechando la capacidad del mecanismo de generar trayectorias rectas al variar el ángulo θ_2, que permite girar al eslabón 2. La unidad de propulsión debe tener la capacidad de desplazarse en el espacio, por esta razón se le agrega 1 GDL prismático perpendicular al plano en el que se mueve el mecanismo, esto se logra con la proyección del punto P, este elemento es el que tiene contacto con el terreno y tiene la capacidad de modificar su longitud L_p, esto lo transformaría de un mecanismo plano a uno espacial con 2 GDL. Con estos cambios la unidad de propulsión solamente podría avanzar sobre un plano que pasa por la trayectoria recta, para variar el

ángulo de la trayectoria recta descrita por el mecanismo se agrega otro GDL rotacional y se vuelve variable el ángulo θ_1. En la figura 4 se muestra en forma simple la unidad de propulsión diseñada y se indican cada uno de los grados de libertad descritos previamente sobre los eslabones en los que actúan.

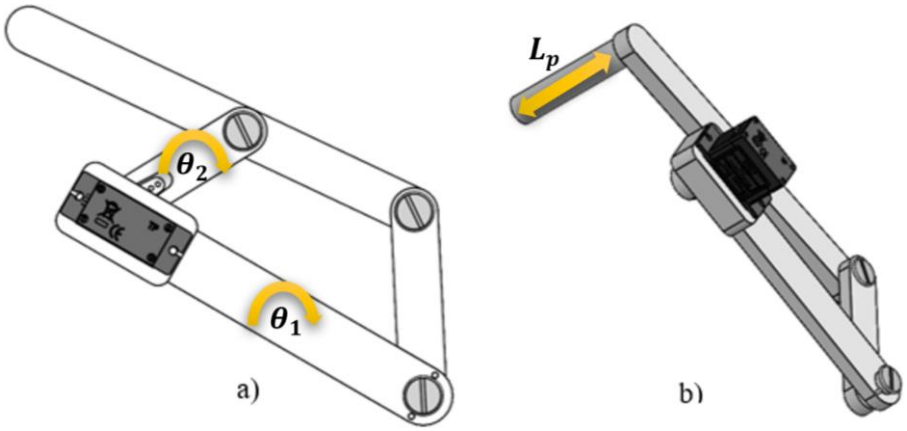


Figura 4. Unidad de propulsión básica a) vista superior y b) vista lateral

Además, en posteriores iteraciones del diseño, se decidió que el robot trabajará por conjuntos de dos patas unidas de manera diagonal.

3.2 Dimensionamiento de la unidad de propulsión

Como se explica previamente, el mecanismo de Evans 2 debe cumplir ciertas relaciones de longitud para cada eslabón y estas están en función del parámetro L, que es igual a la longitud del eslabón L_2, en este caso el valor del parámetro propuesto es $L = 40$ milímetros, debido a que el volumen de impresión máximo es de $200 * 200 * 200\, mm$. En la Tabla 3 se muestran las longitudes de los eslabones, en milímetros, considerando lo anterior.

Tabla 3. Longitudes de los eslabones.

Eslabones	Longitud [mm]
L_1	92.2
L_2	40
L_3	48
L_4	46.68
L_{AP}	60

Es importante señalar que las medidas de cada eslabón proporcionadas en la Tabla 3 se consideran de centro a centro de articulación de revoluta.

4. Resultados

4.1 Simulación CAD

Mediante el uso del software CAD Autodesk Inventor, se diseñaron los componentes que conforman a la unidad de propulsión y se realizó una simulación de movimiento. En la figura 5 se

muestra la serie de imágenes que representan la secuencia de movimientos que describe la unidad de propulsión para desplazar al robot, vista desde la parte superior del mecanismo. La unidad de propulsión generará una secuencia de movimientos cíclica, que inicia con el giro del eslabón 2 en sentido antihorario, movimiento que se denominó descenso, al terminar el descenso se gira el eslabón 2 en sentido horario, movimiento denominado ascenso, hasta llegar a la posición inicial y así iniciar nuevamente el movimiento.

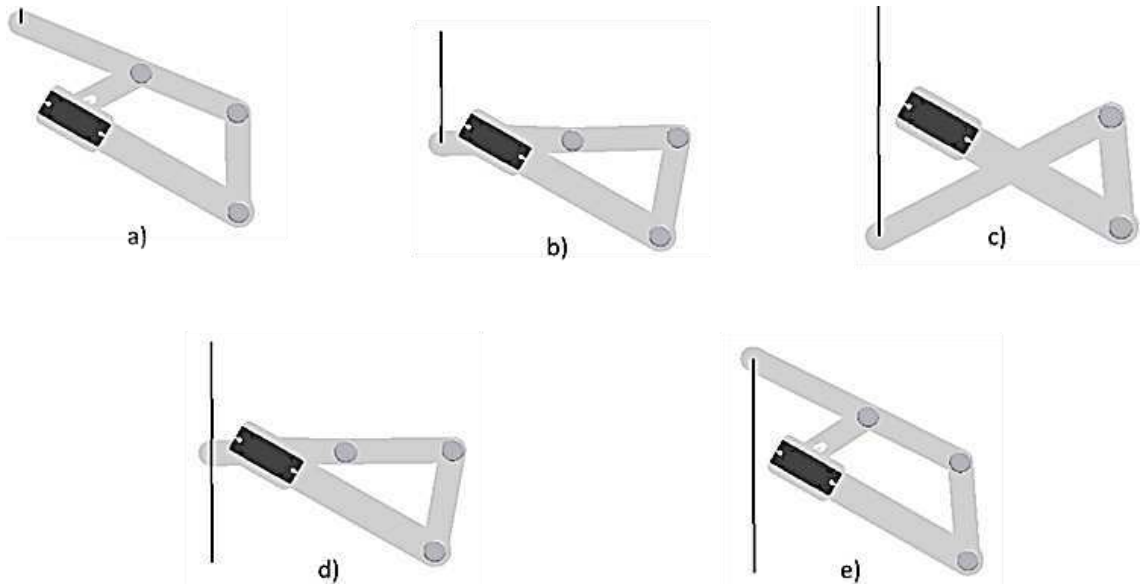


Figura 5. Secuencia de movimientos realizados por la unidad de propulsión para dar un paso, a) Inicio del descenso, b) punto medio del movimiento de descenso, c) punto final del segmento de descenso y comienzo del segmento de ascenso, d) punto medio del ascenso, e) final del segmento de ascenso.

Como se puede notar en la figura 5, el mecanismo describe la trayectoria recta aproximada deseada para el rango de la variable de entrada $-34° \leq \theta_2 \leq 34°$. Para determinar cómo varía la posición angular θ_2, velocidad angular ω_2 y aceleración angular α_2 respecto del tiempo, se emplea un perfil de quinto grado, se considera un tiempo de 5 segundos para ir de la posición angular inicial $\theta_2 = 34°$ a la posición angular final $\theta_2 = -34°$ para el caso de descenso, las condiciones se invierten para el ascenso (ver figura 7); las condiciones iniciales y finales de las velocidades y aceleraciones angulares se consideraron iguales a cero. Con el polinomio obtenido se puede iniciar con la simulación del movimiento, en este caso se utiliza el software libre Octave para resolver el modelo y graficar los resultados obtenidos. En la figura 6 se muestran las gráficas obtenidas al emplear este perfil para determinar las variables de entrada en el segmento de descenso, mientras que en la figura 7 se muestran las gráficas para el ascenso.

Tomando los valores de entrada obtenidos en para descenso (ver figura 6) y sustituyéndolos en las ecuaciones de la (2) a la (7) obtenemos la solución de posición, velocidad y aceleración, en la figura 8 se muestran el perfil de posición, velocidad y aceleración angular del eslabón 3.

Como se puede apreciar en las gráficas mostradas en la figura 8, el eslabón 3 tiene un movimiento en sentido antihorario rotando más de 50°. En la figura 9 se muestran el perfil de posición, velocidad y aceleración angular del eslabón 4, se aprecia que el eslabón 4 tiene un movimiento oscilante en el movimiento de bajada, iniciando una rotación en sentido horario y posteriormente gira en sentido antihorario, por lo que la velocidad tiene componentes positivos y negativos.

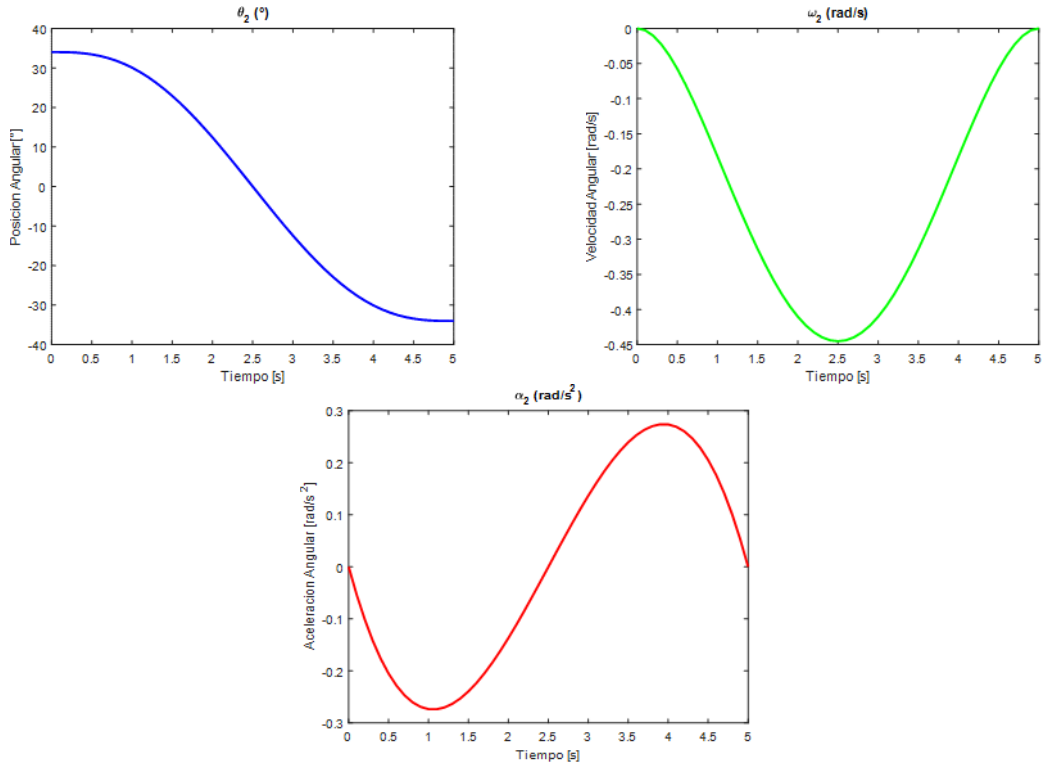


Figura 6. Perfil de desplazamiento polinomial en el segmento de descenso.

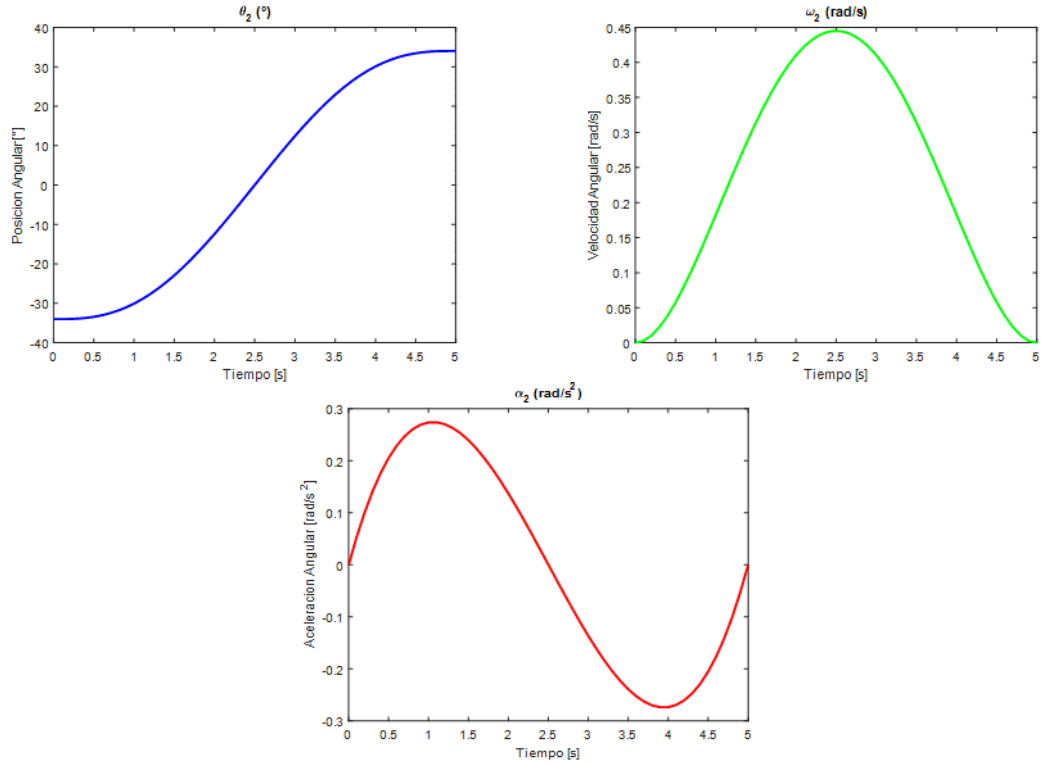


Figura 7. Perfil de desplazamiento polinomial en el segmento de ascenso.

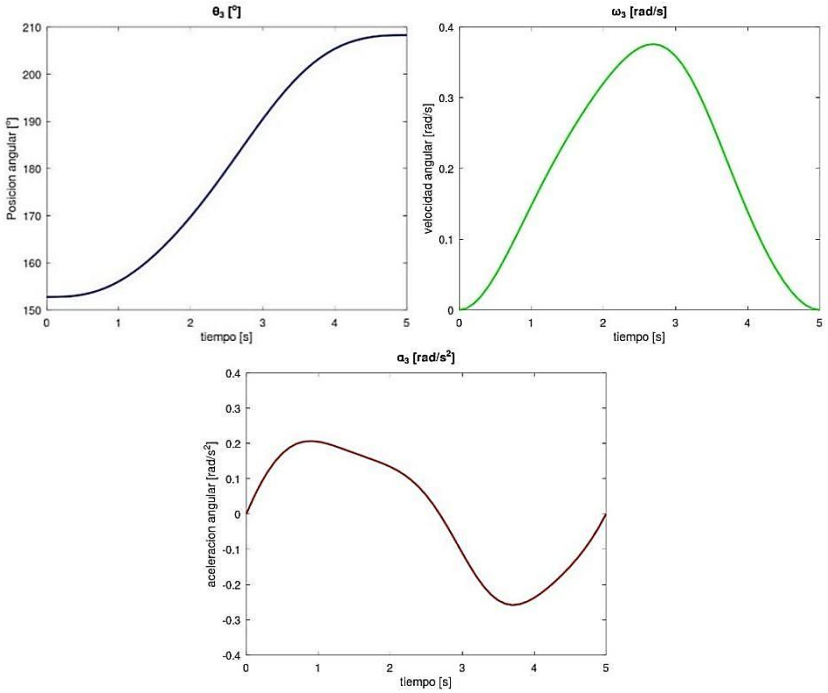


Figura 8. Posición, velocidad y aceleración angular del eslabón 3.

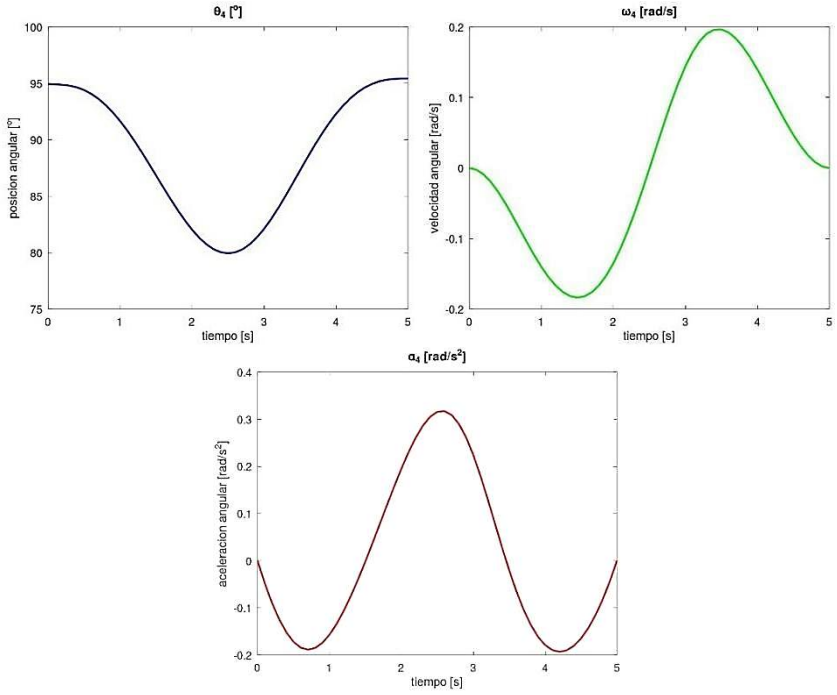


Figura 9. Posición, velocidad y aceleración angular del eslabón 4.

Ya con los valores obtenidos al resolver las ecuaciones de lazo cerrado, se evalúan las ecuaciones (8) a (10), esto permite determinar la posición, velocidad y aceleración del punto P. En la figura 10 se muestran estos valores. En las gráficas superiores se muestra en color azul la posición de

las componentes del punto P durante todo el descenso, se puede apreciar que en la componente x existe una variación en la posición aproximadamente de 0.6 milímetros ya que no es una trayectoria recta exacta; como la trayectoria deseada se describe sobre el eje y, solamente se presentan estas componentes de la velocidad y aceleración.

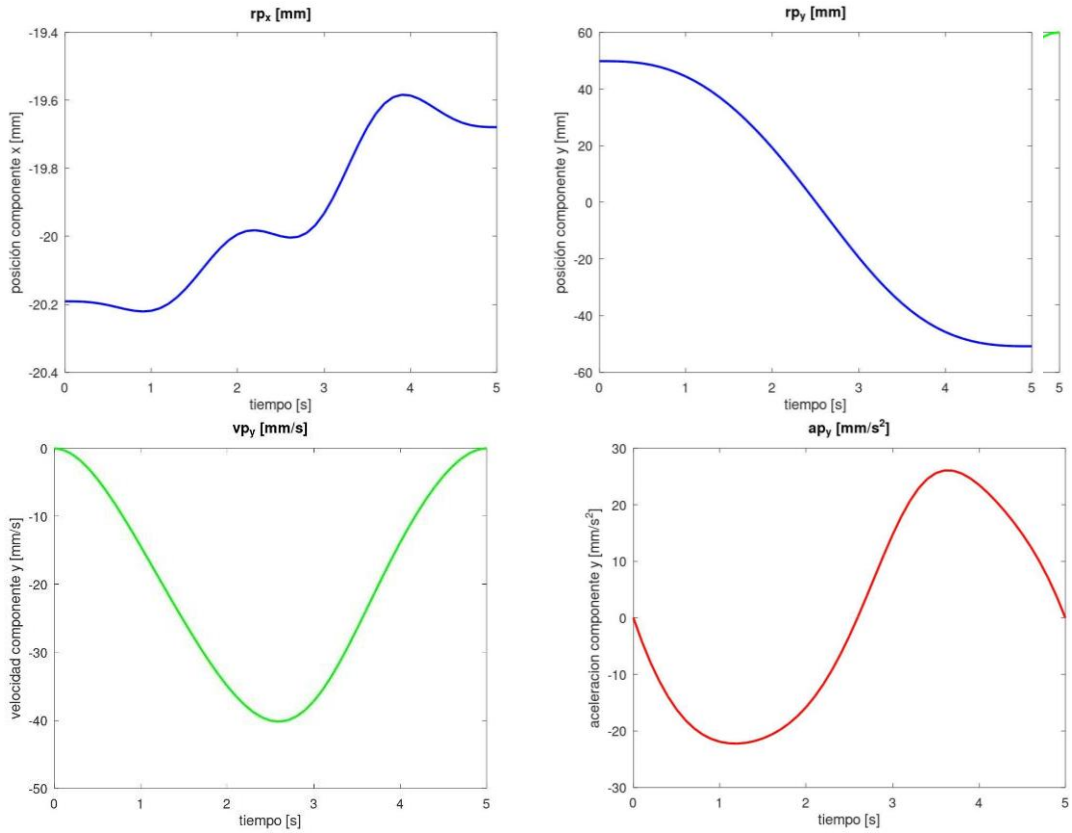


Figura 10. Posición, velocidad y aceleración lineal del punto P.

Estas gráficas muestran la cinemática del mecanismo y gracias a su análisis es posible visualizar que el mecanismo Evans 2 requiere únicamente de una entrada angular pequeña de 68° para describir una trayectoria recta igual a $2.5 * L$. Se plantea que la pierna robótica presentada únicamente describe trayectorias rectas al estar apoyada, lo que la diferencia de la mayoría de las configuraciones empleadas actualmente.

4.2 Comparación con distintas configuraciones de piernas de robot

Una de las principales diferencias de la pierna robótica presentada en este trabajo con las con las configuraciones más comunes usadas en la robótica móvil, es que se reduce el número de GDL necesarios para generar el desplazamiento. En la Tabla 4, se observa que las estructuras tradicionales emplean de 3 a 2 GDL de libertad por extremidad para rescribir trayectorias espaciales o planas respectivamente, el robot bípedo Pasibot emplea 1 GDL ya que usa cadenas cinemáticas cerradas, pero esto lo limita a que únicamente pueda describir una única trayectoria plana. Por otro lado, las piernas reconfigurables emplean algunos grados de libertad únicamente para cambiar su configuración de acuerdo con las necesidades del entorno, por lo que no todos los grados de libertad que tiene son activados para su desplazamiento. Cada grado de libertad requiere de un actuador para ser accionado, se consideran como activos a los que se emplean para el desplazamiento, mientras que los pasivos se usan para generar una reconfiguración.

Tabla 4. Comparativa de piernas robóticas.

Configuración	Actuadores empleados por pierna	Tipo de trayectorias
RRR [1], [2]	3	Espaciales, en un volumen esférico.
SCARA [3]	3	Espaciales, dentro de un volumen cilíndrico.
Paralelo [6]	2	Planas, múltiples.
Paralelo [7]	3-6	Espacial, reconfigurable.
Pasibot [12]	1	Plana, específica.
Jansen [15]	1-5	Plana, reconfigurable.
Nuestra propuesta	1-3	Plana, reconfigurable con plano rotativo

El uso de menos grados de libertad implica un menor número de actuadores trabajando y por ende un menor consumo de energía. Comparado con los otros mecanismos planos reconfigurables existentes, el nuestro permite modificar la inclinación de la trayectoria recta al modificar con un actuador pasivo el ángulo, lo que le permite desplazarse en el espacio.

4.3 Impresión y prototipado

Para verificar el correcto funcionamiento del mecanismo se realiza un prototipo físico, las piezas que conforman al prototipo se realizaron mediante manufactura aditiva empleando una impresora Ultimaker 2+, todos los componentes se imprimieron con material ABS. En la figura 11 se muestra el ensamble del prototipo físico de la unidad de propulsión.

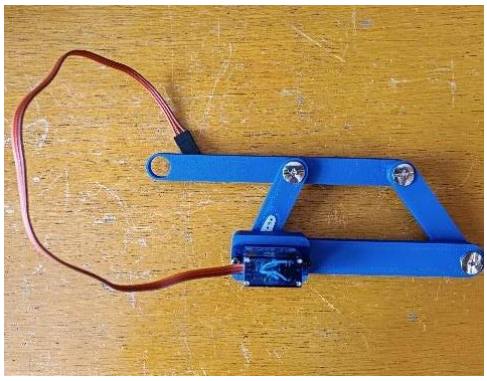
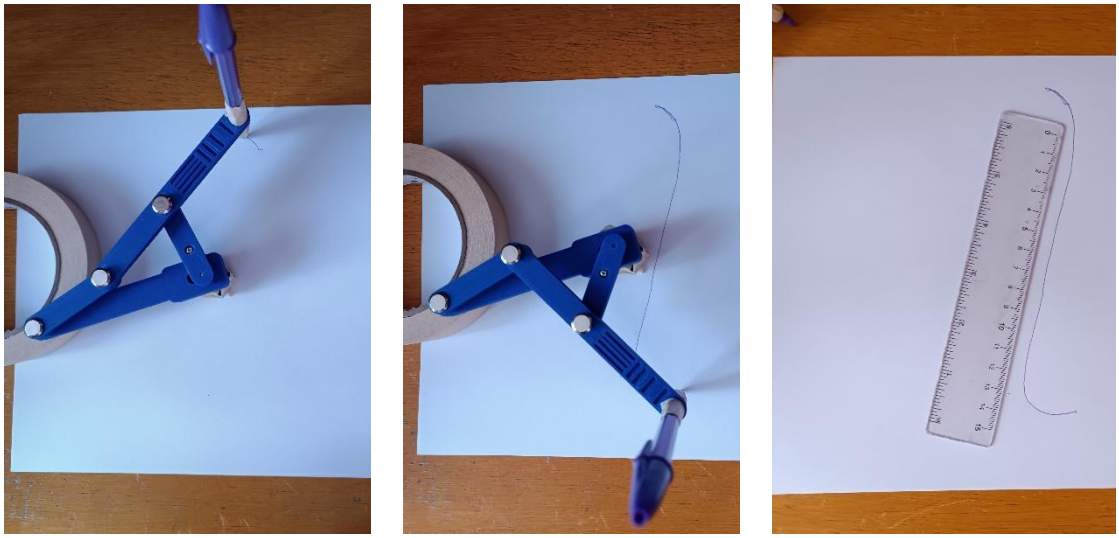


Figura 11. Prototipo de unidad de propulsión realizado por manufactura aditiva.

Con el prototipo ensamblado se realizaron pruebas para verificar que se describa la trayectoria deseada. En la figura 12 se muestra una secuencia de fotos con los resultados de dichas pruebas.

En los resultados mostrados en la figura 12, en el inciso a) se aprecia el inicio del trazo de la trayectoria, en b) se presenta el final del trazo de la trayectoria descrita por la extremidad; la trayectoria recta presenta cierta inclinación con respecto a los bordes laterales de la hoja, las líneas verticales de referencia, y la razón de esto es porque no se tomaron los 30° de inclinación que debe de tener el eslabón 1 con respecto al borde inferior de la hoja, la horizontal de referencia. Además, en la figura 12 c) se muestra el trazo hecho en la hoja y apoyados de una regla se observa que la fracción recta de la trayectoria es de aproximadamente de 10 cm, tal como se había previsto con la simulación. Las irregularidades que se observan en el trazo se deben al movimiento de la pluma usada.



a) b) c)

Figura 12. Resultados de pruebas realizadas con el prototipo de una unidad de propulsión basada en el mecanismo de Evans 2.

Como se mencionaba anteriormente, después de varias consideraciones, se decidió que el robot trabajará por conjuntos de dos extremidades unidas de manera diagonal.

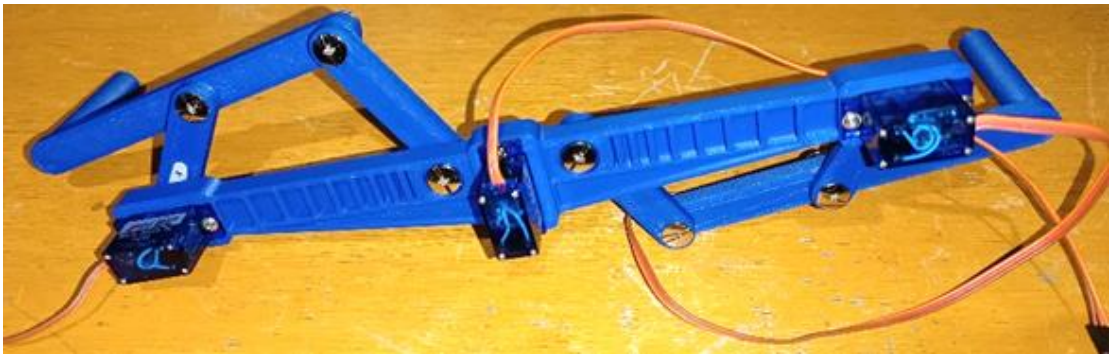


Figura 13. Prototipo de dos unidades de propulsión basadas en el mecanismo de Evans 2.

En la figura 13 se muestra el prototipo de las dos unidades de propulsión ensambladas y unidas por una sola barra. Esta barra representa el eslabón 1 de ambos mecanismos unidos. Se llegó a este diseño al darnos cuenta de que nos convenía que dos mecanismos de Evans estuvieran alineados, esta modificación hace que dos eslabones 1, se encuentren en el mismo cuerpo rígido y así poder emplear solamente un actuador para modificar su posición angular θ_1. Para la unión de los eslabones se emplean remaches que funcionan como ejes de las articulaciones

5. Conclusiones

En este trabajo se muestra que es posible realizar unidades de propulsión de máquinas caminantes basadas en el mecanismo plano Evans 2, esto se logra al dotarlo con dos grados de libertad adicionales uno rotacional y uno prismático, generando un diseño conceptual funcional de la unidad de propulsión. Del análisis cinemático se pueden obtener las relaciones geométricas que permiten visualizar que con un pequeño movimiento angular de entrada de 68° se tiene un desplazamiento de punto P equivalente a 2.5 veces L. El uso de manufactura aditiva permitió realizar un prototipo de forma

rápida y con éste se pudo validar la movilidad y funcionalidad de la unidad de propulsión, obteniendo un diseño satisfactorio. La pierna robótica propuesta emplea menos actuadores activos y tiene la capacidad de adaptarse a trayectorias espaciales al emplear 1 un actuador pasivo.

Este prototipo de unidad de propulsión es la base de futuros trabajos, en los que se pretende concluir con el diseño del robot cuadrúpedo, así como con su análisis cinemático y dinámico, además de realizar el prototipo del robot completo y su control.

Referencias

[1] Chen W., Ren G., Wang J. and Liu D. "*An adaptive locomotion controller for a hexapod robot: CPG, kinematics and force feedback*", *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 57, no. 11, pp. 1–18, Oct. 2014.

[2] Misyurin S., Kreinin G., Nosova N. and Nelubin A., "*Six-Legged Walking Robot (Hexabot), Kinematics, Dynamics and Motion Optimization*", *Procedia Comput. Sci.* vol. 190, pp. 604–610, 2021.

[3] Montes H., Mena L., Fernández R. and Armada M. "*Energy-efficiency hexapod walking robot for humanitarian demining*", *Ind. Rob.*, vol. 44, no. 4, pp. 457–466, 2017.

[4] Guizzo E. "*By leaps and bounds: An exclusive look at how Boston dynamics is redefining robot agility*", *IEEE Spectr.* vol. 56, no. 12, pp. 34–39, 2019.

[5] Hwangbo J. *et al.* "*Learning agile and dynamic motor skills for legged robots*", *Sci. Robot.* vol. 4, no. 26, pp. 1–14, 2019.

[6] Lu M., Jing B., Duan H. and Gao G. "*Design of a Small Quadruped Robot with Parallel Legs*", *Complexity*. vol. 2022, 2022.

[7] Mu D., Luo E., Liu X., Xue B. and Wang H. "*Gait planning and simulation of parallel walking robot*", *2010 IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom,* IEEE, pp. 1553–1557, Aug. 2010.

[8] Hashimoto K., Sugahara Y., Lim H. and Takanishi A. "*Biped Landing Pattern Modification Method and Walking*", *Journal of Robotics and Mechatronics*. vol. 1, pp. 775–784, 2008.

[9] Pan Y. and Gao F. "*Payload Capability Analysis of a New Kind of Parallel Leg Hexapod Walking Robot*", *In Proceedings of the 2013 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, IEEE, pp. 541–544, 2013.

[10] Raibert M., Blankespoor K., Nelson G. and Playter R. "*BigDog , the Rough-Terrain Quadruped Robot*", *In 17th World Congress IFAC*, pp. 10822–10824, 2008.

[11] James P., Prakash A., Kalburgi V. and Sreedharan P., "*Design, analysis, manufacturing of four-legged walking robot with insect type leg*", *Mater. Today Proc.* vol. 46, no. xxxx, pp. 4647–4652, 2019.

[12] Escobar M. and Rubio H., "*Sistema de Estabilización del Robot Pasibot*", in *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, pp. 1–7, 2010.

[13] Sang L., Wang H., Zhang D., Tian Z., Deng F. and Fang D., "*Application of Parallel Mechanism in Varistructured Quadruped/Biped Human- carrying Walking Chair Robot*", *Int. J. Autom. Comput.* vol. 10, no. 5, pp. 447–454, May 2014.

[14] J. Ma, G. Qiu, W. Guo, P. Li, and G. Ma, "Design, Analysis and Experiments of Hexapod Robot with Six-Link Legs for High Dynamic Locomotion", *Micromachines*, vol. 13, no. 9, 2022.

[15] Nansai S., Rojas N., Elara M., Sosa R. and Iwase M. "*A novel approach to gait synchronization and transition for reconfigurable walking platforms*", *Digit. Commun. Networks*. vol. 1, no. 2, pp. 141–151, 2015.

[16] Sun J. and Zhao J. "*An Adaptive Walking Robot with Reconfigurable Mechanisms Using Shape Morphing Joints*", *IEEE Robot. Autom. Lett.* vol. 4, no. 2, pp. 724–731, 2019.

[17] Norton R. "*Diseño de Maquinaria Sintesis y Análisis de Máquinas y Mecanismos*", Quinta Ed. Mc Graw Hill, 2013.

Nota: El presente trabajo de investigación cuenta con el apoyo de la Convocatoria Institucional de Investigación Científica 2023 de la Universidad de Guanajuato, para el desarrollo del proyecto 229/2023 titulado "Análisis, diseño y construcción de un prototipo de robot cuadrúpedo basado en un mecanismo de trayectoria específica".

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 4, pp. 45 – 61
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Diseño de una abonadora agrícola para el cultivo de caña de azúcar mediante software de CAD

Palacios Cortés Ricardo, Flores Montiel Marlem, Vázquez Díaz Jose Juan

Instituto Tecnológico de Cuautla
marlem.fm@cuautla.tecnm.mx

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo del diseño de una abonadora agrícola para el cultivo de caña, uno de los cultivos característicos del estado de Morelos, ocupando el octavo lugar de producción de azúcar a nivel nacional. El cultivo de caña se caracteriza por conllevar una serie de pasos que van desde la labranza de la tierra hasta la fertilización y fumigación. La fertilización es una actividad de las más importantes para obtener un buen rendimiento, en esta actividad se incorporan fertilizantes mineralizados y su aprovechamiento se ve reducido por varios factores, entre ellos la volatilización y falta de humedad, esto afecta a que la planta de caña tenga una deficiencia notable en el rendimiento, repercutiendo así en los ingresos económicos del agricultor. En el desarrollo de la abonadora propuesta se busca ofrecer ventajas como un abonado uniforme del fertilizante, las llantas podrán ser ajustadas a los diferentes tipos de surcado para no afectar el cultivo, y el más importante cubrir el abono con una labranza, así evitando la volatilización del fertilizante y que sea mejor aprovechado. El diseño de la abonadora pretende obtener como resultado un diseño sencillo para que los agricultores puedan usarla de una manera rápida y fácil de entender, los materiales que la conforman son accesibles en el mercado. Mediante software de CAD se desarrolla el diseño de las piezas de la abonadora, así como el análisis para determinar los materiales que se utilizarían ya que estos deben soportar la corrosión de los fertilizantes y los esfuerzos mecánicos, una vez elaboradas las piezas se ensamblan en el mismo software para dar una visión detallada del prototipo y realizar el análisis de movimiento y de esfuerzos mecánicos para comprobar la funcionalidad y resistencia del prototipo.

Palabras clave: abonadora, diseño, análisis.

1. Introducción

En la actualidad en el estado Morelos en algunas zonas se cultiva caña de azúcar, lo cual para su producción se lleva a cabo una actividad de suma importancia que es la fertilización mineralizada. En la mayoría de las zonas aún se hace de manera manual, esto ocasiona que el proceso sea más rudimentario y riesgoso por el contacto físico con los fertilizantes químicos, también el fertilizante se ve afectado por varios factores como la volatilización y falta de humedad, esto ocasiona que el abono se desperdicie y no pueda ser aprovechado en su totalidad por la planta y como consecuencia afecte el rendimiento directamente al cultivo de caña.

El diseño de una abonadora agrícola para el cultivo de caña en este proyecto se enfocará para que el fertilizante sea mejor aprovechado por la planta y evitar su volatilización tapándolo con tierra. El diseño de la abonadora será de una manera fácil, para que su uso sea sencillo de manejar y económicamente esté al alcance de la mayoría de los agricultores. Este trabajo se enfoca también en el uso de un software CAD para realizar estudios, como son de movimiento, esfuerzos que se llevarán en la estructura para ver si es óptimo el diseño de la abonadora.

Un punto importante en la agricultura sin duda son los abonos; ya que es utilizado para enriquecer las propiedades y calidad del suelo destinado a cultivos y las plantaciones, es esencial para preparar la tierra y conseguir que la misma cuente con los nutrientes necesarios para que las plantas luzcan y sean saludables. También las abonadoras juegan un importante papel en la agricultura ya que se encargan de distribuir los abonos equitativamente, facilitando el trabajo de los agricultores.

En la actualidad las abonadoras son necesarias para satisfacer las altas demandas de alimentos de la población. Con la ayuda de fertilizantes es posible aumentar la cantidad de nutrientes del suelo y obtener niveles de producción muy elevados. Estas son usadas en frutales, viñedos e incluso otros tipos de cultivo. En la actualidad las abonadoras han evolucionado y algunos todavía no tienen claro qué tipos existen y cómo funciona cada una de ellas. [1]

Una abonadora agrícola es una máquina distribuidora de fertilizantes y componentes orgánicos en general, que se usa en el campo para acelerar el proceso de crecimiento de las plantas. Desde la antigüedad, esta técnica fue aplicada por el ser humano para obtener productos saludables y, con el tiempo, fue perfeccionándose gracias a la mecanización [2].

Normalmente, una abonadora cuenta con cuatro elementos principales que son: la tolva, el distribuidor, el dosificador y el accionamiento. La tolva sirve para facilitar la salida del fertilizante mientras que, el distribuidor, esparce el abono mediante el accionar del motor hidráulico o la fuerza del tractor. El dosificador es el que se encarga de calcular la cantidad de abono que sale de la tolva para asegurar una dosis perfecta según el tipo de plantas que necesitan fertilizantes. Y el accionamiento se realiza mediante la rueda del tractor, la toma de fuerza o las ruedas portadoras de la máquina [2].

El propósito fundamental de este proyecto es asegurar el aprovechamiento de los nutrientes aplicados al cultivo de caña de azúcar. Al ser aprovechado por la planta, mejorará la producción y por ende los ingresos económicos de agricultores que tienen como único ingreso el pago por tonelaje de esta actividad. La mayoría de las abonadoras agrícolas comerciales, se venden como aditamentos de tractor, pero para familias de escasos recursos no es una solución viable. Con este proyecto se plantea que el prototipo sea económico, que tenga facilidad de uso y sea ajustable a la altura y ancho de los surcos para el cultivo de caña de azúcar, para terrenos característicos del estado de Morelos.

2. Descripción de una abonadora

2.1 Tipos de abonadoras agrícolas [3]

- Abonadora Centrífuga.
- Abonadora Neumática.
- Abonadora De Riego Agrícola.
- Abonadora Por Gravedad.
- Esparcidoras De Materia Orgánica.
- Abonadoras De Discos.
- Abonadoras Pendulares.
- Abonadoras Localizadoras.
- Sembradoras Combinadas.
- Pulverizadores.
- Equipos Para La Aplicación De Amoniaco Anhidro.

2.2 Partes que componen a los diferentes tipos de abonadoras

En todas las abonadoras, se pueden distinguir las siguientes partes esenciales:

- Chasis.
- Tolva.

- Dosificador.
- Órganos de distribución.
- Órganos de accionamiento.

La fertilización de la caña de azúcar tiene como objetivo proveer al cultivo los elementos nutricionales que el suelo no le puede ofrecer en forma disponible, para su buen crecimiento, desarrollo y producción. Esta práctica debe asegurar la correcta aplicación de las dosis y fuentes de nutrientes, en el tiempo y localización más adecuados, buscando obtener productividad de óptima rentabilidad, con el uso eficiente de los insumos y protección del medio ambiente. El manejo adecuado y sostenible de los nutrientes y la fertilización conlleva el conocimiento y manejo adecuado del suelo para asegurar la fertilidad y el aprovechamiento máximo de los nutrientes aplicados. Los factores del suelo, el manejo del cultivo, la fertilización y las condiciones ambientales en su conjunto, definen la producción, según los requerimientos y potenciales de producción de las variedades de caña de azúcar.

2.3 Preparación de Tierras

En zonas de producción, se requiere de una buena preparación del terreno, en muchos casos, dependiendo de la envergadura del terreno se requiere de maquinaria agrícola para la realización del roturado, rastreado y nivelado con la finalidad de asegurar una buena cama de adaptación para la semilla. El uso de la maquinaria también tiene la importante finalidad de habilitar terrenos marginales al erradicar malezas tóxicas para el ganado como la bacteria kellu (himenoxis robusta), antes de que empiecen a germinar las semillas.

Para esto podemos decir que la tierra es el asiento esencial de la agricultura, por lo que su acondicionamiento y conservación son vitales para una producción agrícola exitosa. Desde hace miles de años, con el descubrimiento del arado, el hombre “prepara la tierra”, es decir, la remueve y voltea a través de una operación que requiere de tracción (animal o mecánica). Sus principales objetivos son:

1.- Preparar un lecho para que la planta pueda germinar.
2.- Distribuir de manera correcta el terreno en un número correcto de surcos.

En los tiempos pasados hasta la actualidad, los agricultores han fertilizado los suelos por medio de su propia mano, movilizando pequeñas cantidades de abono por medio de sacos en su espalda o bien por mecanismos tipo carretillas para poder así cubrir el área de sembrado. En este proceso interviene ciertos animales utilizados para el arrastre de una carreta con mediana capacidad de abono, aquí se utilizaban dos operarios el primero tenía la función de guiar a los animales por la dirección correcta y el segundo tenía la función de esparcir el abono con herramientas simples como trinches azadones y palas [4].

La utilización de maquinaria para la agricultura es muy utilizada alrededor del mundo gracias a las ventajas que estas tienen, pero a su vez son un tanto costosas. En una abonadora tanto de abono orgánico como abono mineral o inorgánico los componentes principales que definen esta máquina son: La caja de carga: La caja de carga es la de un remolque normal, con el fondo metálico o de madera y con laterales plegables hacia el exterior, de forma que se facilita la carga y descarga de materiales, cuando el repartidor es utilizado como remolque. Conviene señalar que la cantidad de abono transportado depende de la carga soportada por el eje, y de la altura de los molinetes de reparto medida desde el fondo de la caja, que, evidentemente, es más elevada para los molinetes verticales que para los horizontales. A continuación, se describirán las diferencias entre el sistema de alimentación y el sistema de distribución [4].

El sistema de alimentación: El sistema de alimentación tiene la misión de llevar el abono al sistema de distribución de forma regular. Están constituidos por barras metálicas unidas a dos cadenas paralelas, que las arrastran por el fondo de remolque. Las cadenas casi siempre se desplazan encastradas en ranuras practicadas en el fondo del remolque o a su vez bandas transportadoras de varias lonas anticorrosivas movidas por rodillos motrices. El sistema de alimentación, que puede ser

tipo de transportador continuo y de barras equidistantes, puede ser accionado por las propias ruedas del remolque, por la toma de fuerza del tractor y por transmisión hidráulica, si bien el accionamiento por las ruedas del remolque solo es utilizado por los distribuidores de poca capacidad.

El accionamiento por la toma de fuerza, si esta es sincronizada, es decir, que velocidad de giro es proporcional a la velocidad de avance del tractor, la dosis aportada es independiente de la velocidad de marcha de la máquina, y para modificarla sólo es preciso actuar sobre la palanca de regulación del remolque distribuidor, en cambio, si la toma de fuerza es independiente como el régimen de rotación es proporcional a la velocidad angular del motor y no a la velocidad de marcha, para obtener una dosis determinada de abono es necesario actuar simultáneamente sobre la actividad de avance del tractor, sobre el régimen del motor y sobre la regulación de la propia máquina.

2.4 Ventajas y Desventajas de los procesos de distribución de fertilizantes.

Con base en los estudios bibliográficos y a la investigación de experiencia en el campo de la agricultura, se observa de forma detallada las ventajas y desventajas que presentan los diferentes métodos de distribución de abono para así poder determinar el óptimo para el actual proyecto [4] (Tabla 1).

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los procesos de abonado.

Manual.		Tiro Animal.		Mecánico.	
Ventajas.	Desventajas.	Ventajas.	Desventajas.	Ventajas.	Desventajas.
No tiene costos de operación. Cualquiera puede realizar el trabajo.	Es lenta e ineficaz. La fuerza generada para el trabajo no es constante El trabajador necesita descanso	Costos bajos de operación Se emplean herramientas simples para su ejecución.	Se trabaja poca área en demasiado tiempo. Los animales necesitan agua y descanso para continuar con el proceso de abonado. No se puede dosificar la capacidad de abono de una manera exacta.	El área trabajada es grande en tiempos cortos. No se necesita descanso, por lo tanto, se puede trabajar en largas jornadas. Es muy eficaz y su precisión es mayor. Puede regular la dosificación	El costo es más elevado que los anteriores. Se necesita mantenimiento, regular dependiendo de los componentes

Por razones lógicas los procesos mecánicos son mejores en comparación a los otros cuando se habla de eficiencia y menor tiempo en el que se efectúa el trabajo Tabla 1: Ventajas y desventajas de los procesos de abonado. Haciendo énfasis en los sistemas de distribución y alimentación ya que son estos los que caracterizan las diferencias de las máquinas [4].

Una buena abonadora además de estar diseñada para realizar buenas distribuciones y de disponer de un buen manual que contribuya a ello, tiene otras muchas características constructivas que conviene también analizar al detalle y que son muy importantes. Estas características de una buena abonadora son importantes para el usuario, y afectarán a su grado de satisfacción. También influyen sobre la capacidad de trabajo real de la abonadora, sobre su vida útil, seguridad y valor residual.

3. Descripción y características

3.1 La tolva

La tolva es un contenedor en forma de cilindro, el cual tiene el fondo en forma de cono invertido que termina en una abertura mucho más pequeña que el diámetro de la parte de arriba. Es el dispositivo cuyo propósito está destinado al depósito y canalización de materiales granulares, pulverizados o líquidos y se lo construye de varios tamaños y formas ya sea principalmente en acero inoxidable para líquidos u otro material que evite la oxidación para granos. Un material alternativo podría ser el acero laminado galvanizado ASTM A653, ya que, a comparación del acero inoxidable, los costos son extremadamente menores. Se escoge este material para la construcción de cada una de las piezas de la máquina excepto los tornillos sin fin y las patas, debido a que es un producto que posee las características de resistencia mecánica del acero y es muy resistente a la corrosión gracias al zinc que posee. El zinc se puede usar en alimentos que no estén destinados al consumo humano, en este caso, el alimento es para consumo animal, y no estará estancado ya que circulara todo el tiempo, por lo tanto, no existe riesgo de contaminación En algunas tolvas se colocan cribas interiores, muchos modelos llevan tamices dentro de la tolva, para evitar el acceso al dosificador de objetos no deseados o fertilizan apelmazado.

3.2 Movimiento del prototipo

Para este prototipo se plantea la idea de usar como motor la fuerza humana, unos de los objetivos es que el prototipo sea lo más económico para cualquier agricultor, Ya que el motor más tradicional de combustión interna para obtener la energía de movilidad necesita una energía química con la que cuentan los combustibles y según el diario “El Economista”, el precio promedio nacional de la gasolina regular fue de $19.35 pesos por litro, lo que implicó un incremento anual de 5.61%, con lo que fue superior en 2.78 puntos porcentuales al crecimiento inflacionario del año, contrario a las promesas de la actual administración y eso fue en el 2019. Este año inició el 1 de enero de 2023 con una brutal alza del impuesto a la gasolina, del 7.36 por ciento. Sin duda un problema grave para este tipo de motor.

Otros motores como el motor eléctrico o los híbridos son sumamente costosos sin mencionar que los eléctricos necesitan recargar su energía en este caso un “centro de carga” y algunos países del tercer mundo no cuentan con esa tecnología. Una forma de ahorrar sería implementar un motor de accionamiento con la energía de uno mismo, en este caso una cadena de bicicleta es una parte del dispositivo mecánico utilizado en este tipo de vehículos para transmitir la potencia de tracción entre los pedales y la rueda trasera. Está compuesta de una serie de eslabones en forma de rodillos articulados, fabricados a medida del paso de las ruedas dentadas con las que engranan y no solo funcionaria para la movilidad del prototipo también se planea utilizar la fuerza de los piñones para accionar el tornillo sin fin que estará en la tolva. Propuesta para generar el movimiento de la abonadora para el accionamiento del tornillo sin fin, de acuerdo con la Figura 1.

Figura 1. Movimiento de pedal.

3.3 Chasis

Para el modelo del chasis se plantea utilizar el modelo de los suecos llamado “Armadillo”, ver Figura 2. La empresa sueca que lo comercializa, Velove, ha tardado siete años en desarrollarlo. Técnicamente se trata de una bicicleta eléctrica de carga, pensada para lo que se llama entregas de la última milla. Es decir, las entregas que tienen que hacer los mensajeros a menos de 2 Kilómetros del destino. Normalmente se considera así al tramo que hay entre la central local de la empresa de mensajería, y el destinatario, ya que no suele superar los 5 o 10 kilómetros.

Figura 2. Armadillo.

3.4 Material

El material con el que se trabajará para el chasis de la abonadora será el PTR. Los PTR son tubos que tienen una excelente resistencia a la compresión y a la torsión. Pueden tener forma cuadrada o rectangular. Una de sus principales características es que tienen gran versatilidad para la fabricación de estructuras, porque pueden ser doblados, soldados. Este tipo de perfil garantiza la resistencia estructural demandada para casos específicos. Gracias a sus características, son muy usados para la construcción, ya que a la par de las columnas y los cimientos, son parte fundamental de las estructuras.

Se fabrican de diferentes materiales tales como el hierro o acero, con diferentes aleaciones. Los expertos eligen el uso que se les da en cada caso. Él PTR (Perfil Tubular Rectangular) conocido coloquialmente como "tubo cuadrado", se utiliza principalmente como elemento estructural en la construcción de edificios, barandillas, postes de señalización, torres de telecomunicaciones, entre otros. Se mide por las dimensiones de sus paredes exteriores (que son del mismo tamaño); así como su espesor (lo cual determina el calibre del PTR), ver Figura 3.

Los materiales más utilizados para fabricar este tipo de tubo son aluminio y acero, aunque el hierro también es ampliamente utilizado por su tenacidad en estructuras donde el riesgo de óxido no sea relevante. Están disponibles en muchas longitudes de almacenaje, aunque pueden fabricarse a la medida.

Figura 3. Tubo cuadrado PTR.

3.5 Tornillo Sin Fin

Como se indicó anteriormente los tornillos sin fin, estarán colocados dentro de una caja que se ubicada en la parte inferior de cada tolva; a diferencia del resto de modelos, el tornillo sin fin no se puede definir como un sistema de sujeción, sino que se trata de un elemento encargado de transmitir movimiento entre los ejes de una máquina. Esto se debe a que su diseño le permite girar de forma indefinida y garantizar el desplazamiento de los engranajes. El tornillo sin fin, se encuentra dentro de una caja que se ubicará en la parte inferior de la tolva, ver Figura 4.

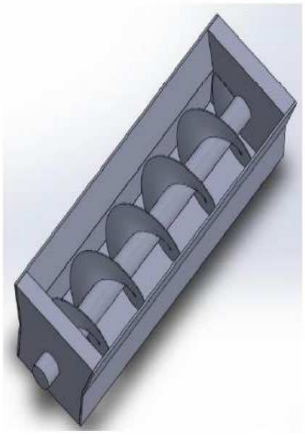


Figura 4. Tornillo Sin fin.

4. Desarrollo

El diseño está basado en un triciclo de carga pesada, uno de los objetivos del proyecto es que la abonadora sea económica debido a los altos precios del abono, entonces se propone el diseño de una abonadora capaz de utilizar la fuerza humana para llevar a cabo el trabajo de distribución del abono. En cual el abono es colocado en la tolva y distribuido con un tornillo sin fin, para finalmente ser cubierto por una reja agrícola. Se puede mejorar el diseño implementando lo que son amortiguadores en las partes traseras de las ruedas, pero eso implicaría un costo adicional; por tal motivo, esta abonadora sólo se diseñó para trabajos en superficies planas. El diseño de la abonadora es con piezas comerciales para evitar que sea lo más elevado el precio.

4.1 Chasis

Se le denomina chasis o armazón de un auto cuyo propósito es fijar los distintos elementos que forman una unidad, en este caso se realiza el diseño del chasis para que tenga una base de descanso para la tolva, y otra para el asiento. En la parte inferior se le agrega otro descanso que puede ser utilizado para guardar herramientas, abono o adaptar un motor. El material utilizado es un PTR (Acero inoxidable), como material alternativo podría ser el acero laminado galvanizado ASTM A653, ya que, a comparación del acero inoxidable, los costos son extremadamente menores.

Se escoge este material para la construcción de cada una de las piezas de la máquina, excepto los tornillos sin fin y las patas, debido a que es un producto que posee las características de resistencia mecánica del acero y es muy resistente a la corrosión gracias al zinc que posee. En la parte atrás inferior del chasis se encontrará una corrediza con la función de ir posicionando la reja agrícola que servirá para cubrir la caña para evitar desperdicios, ver Figura 5.

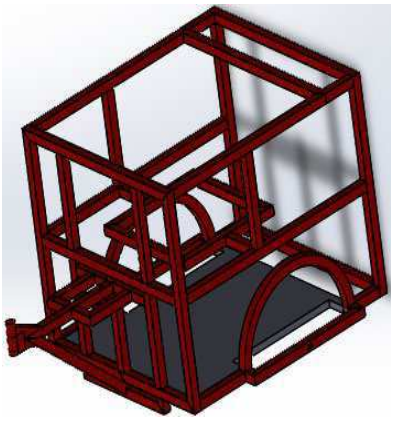


Figura 5. Diseño de Chasis.

4.2 Tolva

La tolva tiene un diseño para una capacidad de hasta 50 kilos de abono y como máximo 60 kilos. La tolva es desmontable, lo cual permitirá al usuario cambiar en caso de sufrir roturas y darle un mantenimiento periódicamente. El material utilizado para el diseño de la tolva es lámina de acero inoxidable, debido a que es un producto que posee las características de resistencia mecánica del acero y es muy resistente a la corrosión que será generada por los fertilizantes gracias a su aleación con zinc. En la parte inferior se encuentra una base donde se encontrará el tornillo sin fin, el cual nos ayudará a distribuir el abono y evitando así también que se apelmace. Su mantenimiento no será laborioso debido a su forma sencilla de montaje se podrá desmontar y limpiar con agua, ver Figura 6.

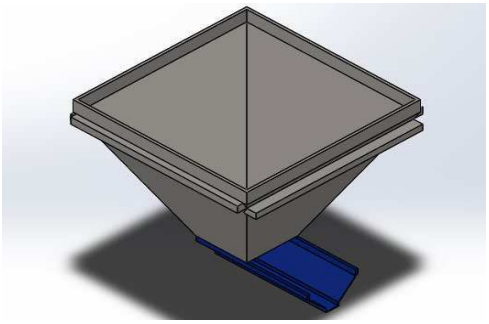


Figura 6 Diseño de Tolva.

4.3 Tornillo sin fin

Se preselecciona una barra de hierro macizo que sirve como eje para crear el tornillo sin fin, es del tipo SAE-4140, las propiedades mecánicas más importantes de un material como el hierro son tenacidad, maleabilidad, ductilidad, dureza, deformación plástica, resistencia a la abrasión. Esto hace de este material apto para colocarlo como eje del tornillo sin fin, puede aguantar las presiones sin deformarse y con una capa de pintura acrílica, se lo protege de la oxidación.

Las características de este material son:

Esfuerzo a la fluencia: 690 Mpa
Esfuerzo máximo: 900 – 1050 MPa (130 – 152 KSI)
Elongación mínima: 12%
Densidad: 7.85 g/cm3

Esta barra tendrá un diámetro de 40 cm en donde se colocarán las tiras del acero inoxidable las cuales al ser soldadas y estiradas darán la forma de tornillo sin fin que se desea, un parámetro que se analizó fue la cuerda del tornillo teniendo una separación de 2.5 cm esto con la finalidad de evitar que el fertilizante sea dañado y cambie su estructura y sea pulverizado, ver Figura 7. El acero que se utilizó para formar el tornillo sin fin fue el acero inoxidable AISI 304, su resistencia mecánica es de 60 kg/mm2 y su dureza de 175-200HB (Dureza Brinell), también por resistencia a la corrosión que generará el fertilizante debido a que contiene nitrógeno, es un acero muy comercial en el mercado de la metalurgia ya que resiste temperaturas de hasta 400ºC [12].

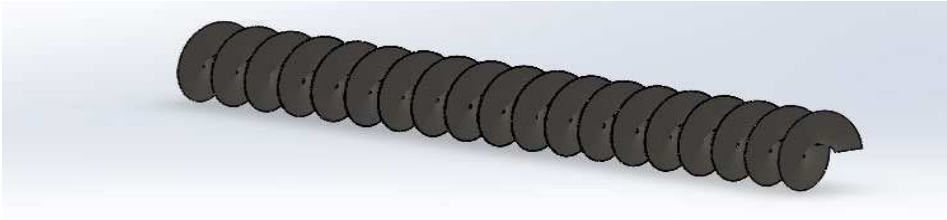


Figura 7. Diseño De Tornillo Sin Fin.

Para dar movilidad al tornillo, se colocó en la parte de atrás del mismo un engranaje con un piñón, sujetos a las ruedas traseras, una vez iniciada la marcha de la abonadora, comenzará a trabajar el tornillo sin fin. Éste elemento roscado nunca va acompañado por una tuerca, y sí engranado con una rueda dentada, con la que forma un mecanismo que permite una gran reducción de velocidades [12]. El tornillo sinfín se puede considerar, por tanto, como una rueda dentada de un número de dientes igual al número de entradas. El mantenimiento consiste en aceitar las partes móviles que son los baleros que se encuentran en las partes internas y laterales del tornillo y piñón, ver Figura 8.

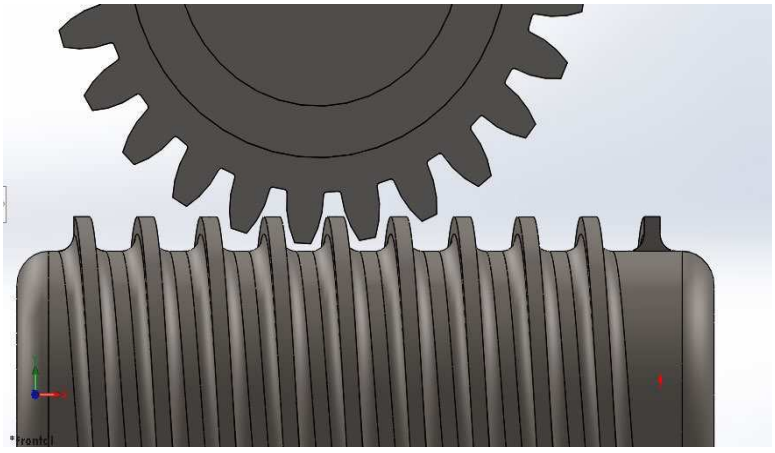


Figura 8. Tornillo Sin Fin Piñón.

4.4 Ruedas

La rueda tiene un tamaño comercial de 29'' pulgadas y grosor de 2.1", la altura de la llanta delimita que el prototipo solo se pueda usar en etapas de brotación, macollamiento y crecimiento vegetativo, pero una ventaja del chasis es que puede incorporarse ruedas más grandes y gruesas. En las ruedas tiene incorporada una polea, que va dirigida al piñón, una vez iniciado el movimiento de las ruedas empezará a trabajar el tornillo sin fin para distribuir el abono, con estas llantas el prototipo podrá entrar al campo cuando el suelo tenga la textura y la humedad adecuada para evitar atascamientos y compactación en el suelo. Lo más recomendable sería entrar antes del riego del cultivo, para que el fertilizante al taparse se evite la volatilización y no haya lixiviación. Ver Figura 9.

Figura 9. Rueda y Polín.

4.5 Reja Cultivadora.

Una vez cumpliendo con el objetivo de abonar, se necesita cubrir el abono para que pueda ser absorbido por el cultivo de la caña de azúcar; para eso, se utiliza una reja cultivadora, que se ilustra en la Figura 10. La cual se encuentra en la parte inferior trasera del chasis, con una capacidad de profundidad de 20cm a 30cm, ajustable por los ejes x, y. En el chasis se le adapta una corrediza. Mantener limpio el arado es uno de los aspectos más importantes para conseguir que funcione de manera más eficiente posible. La función de la reja será abrir un surco en el cual estará situado a unos 15 cm de la planta, será depositado el fertilizante y por gravedad la tierra volverá a caer en el surco tapando el fertilizante. Hay que tener en cuenta que al trabajar la tierra es muy fácil que se ensucie, sobre todo si está húmeda, para ello se recomienda usarla cuando el suelo tenga la humedad correcta para labrarla.

Figura 10 Reja Cultivadora.

5. Resultados

Una vez realizadas las piezas y el ensamblaje de las mismas, se realizan diferentes estudios que ayudarán a conocer si se cumplen o no los objetivos planteados, o si será necesario modificar algunos de los aspectos que lo componen. Primero se sometieron las piezas a un mallado, es un paso crucial en el análisis del diseño, el software crea automáticamente una malla combinada de elementos sólidos, de vaciado y de viga. La malla sólida es adecuada para los modelos voluminosos o complejos en 3D.

Se propone un modelo de diseño versátil que se podrá adecuar a los diferentes tipos de siembra, sin embargo, el diseño desarrollado ha tomado como muestra la caña de azúcar, ya que es uno de los elementos principales de cultivo en la zona, teniendo como prototipo final el mostrado en la Figura 11.

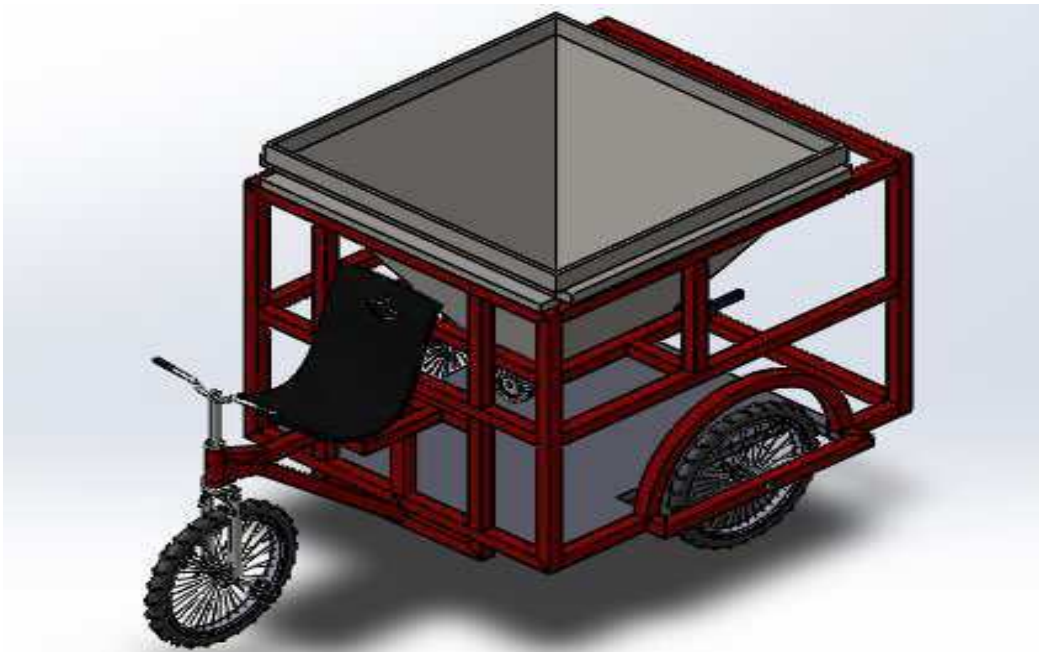


Figura 11. Prototipo Abonadora.

5.1 Propiedades físicas del prototipo

Con ayuda del software se busca hacer un análisis de las propiedades del prototipo en las cuales se obtiene la masa, volumen, área y centro de masa, un punto a observar fue la masa del prototipo representaba un valor muy elevado en el simulador de 2195.18 kg ya que no respetaba el hueco de los PTR (ver Figura 12), pero al hacer la sumatoria del material y contemplando el peso por metro lineal del PTR el chasis tiene un peso de 125 kg, más los demás componentes que lo conforman, llegando a un peso total de 165 kg a 185 kg.

5.2 Análisis del chasis

El análisis estático lineal, calcula los desplazamientos, las deformaciones unitarias, las tensiones y las fuerzas de reacción bajo el efecto de cargas aplicadas. Todas las cargas se aplican lenta y gradualmente hasta que alcanzan sus magnitudes completas.

El chasis es sometido a un peso de 250 kg calculando el peso del prototipo, el fertilizante y la persona que lo operara para poder ver el comportamiento de deformaciones en la estructura, en la Figura 13, se puede observar el punto de tensión afectado. Donde la base superior de la tolva y la inferior son las más afectadas; sin embargo, en la parte de deformación no presenta ningún tipo de ruptura, indicando que el material propuesto soportará sin problema.

Otro punto a tratar, de acuerdo a la Figura 14, se muestran los desplazamientos del chasis, donde se puede observar que la base inferior que soporta la tolva presenta más movilidad.

Para realizar la disminución de desplazamientos, se propone unir la base de la tolva superior con la inferior creando una pirámide invertida, ver Figura 15.

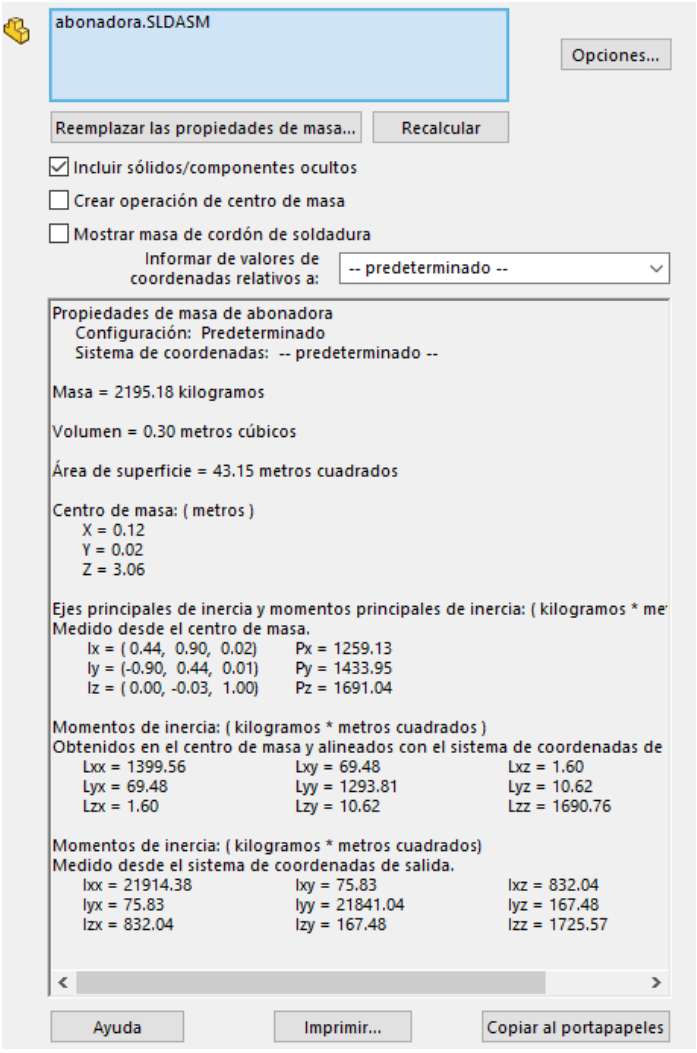


Figura 12. Propiedades físicas del prototipo.

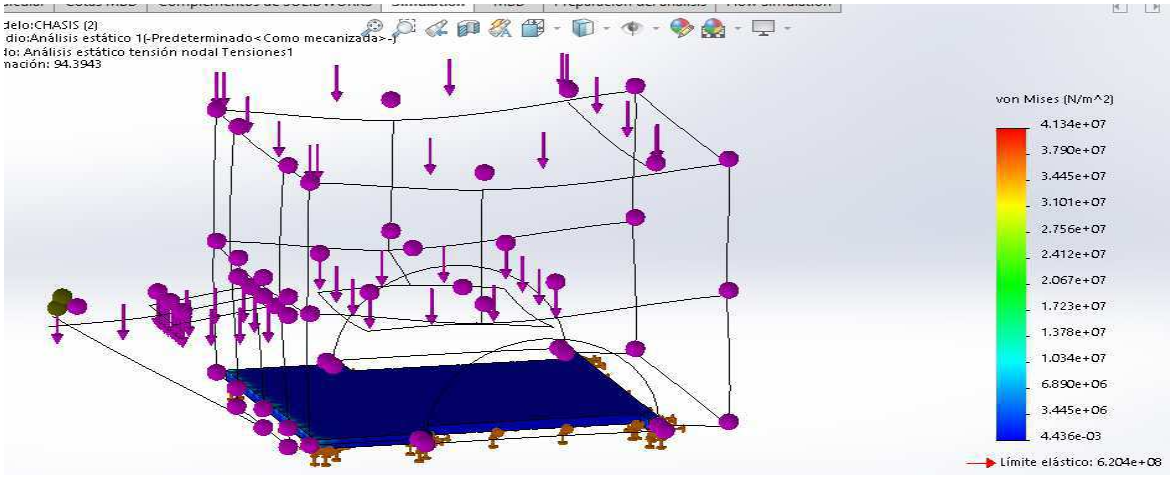


Figura 13 Estudio de Tensión Chasis.

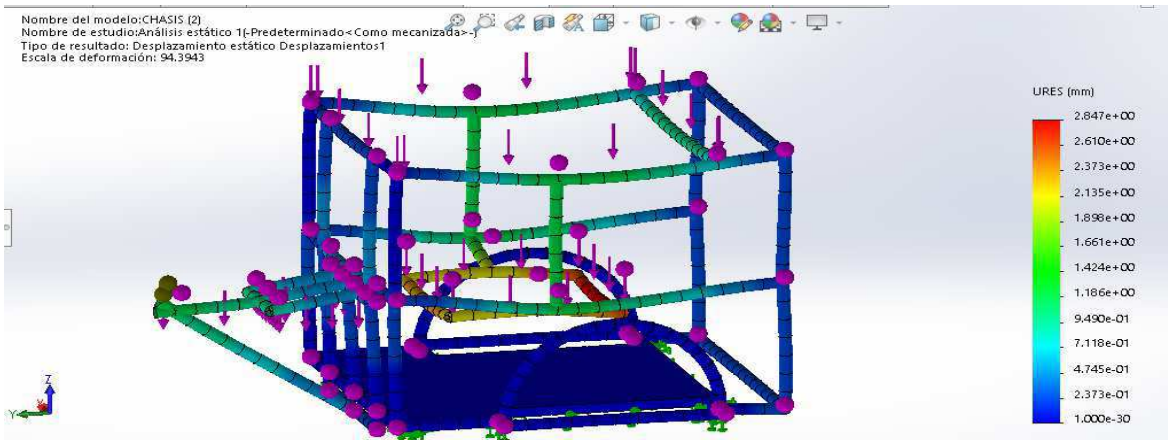


Figura 14. Estudio de Desplazamiento Chasis.

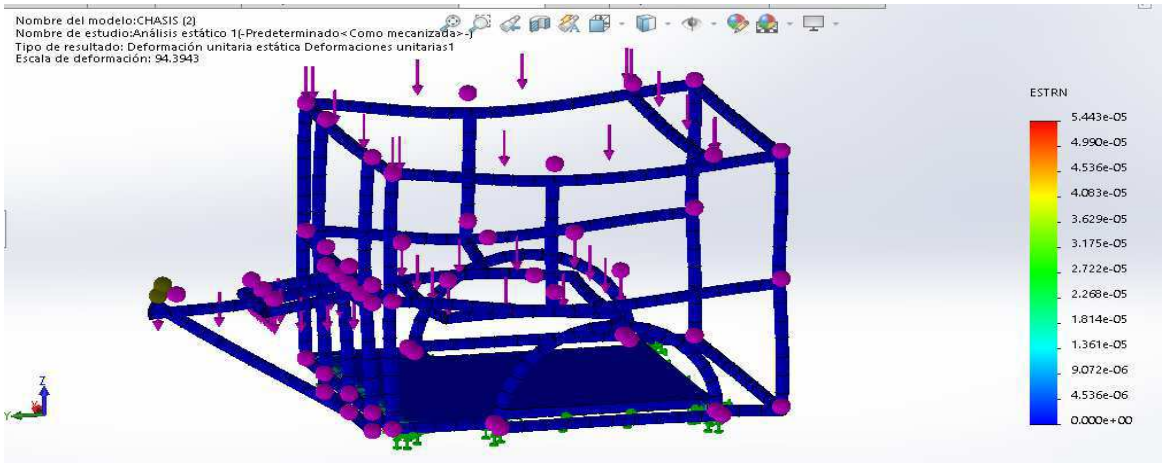


Figura 15. Estudio de deformación Unitaria Chasis.

5.3 Análisis de la tolva

En cuestión del diseño de la tolva se tomó en cuenta la corrosión que genera el fertilizante al tener contacto con algunos metales para ello, una de acero inoxidable fue la mejor opción para su diseño. En la parte interna de la tolva en sus paredes se ejercerá una presión por parte del fertilizante esto dependerá de la cantidad del fertilizante que se le aplique. En su análisis la tolva presentó deformación en sus paredes, para evitar la deformación en la zona donde es montada se diseñó una serie de soportes los cuales serán de gran utilidad. Los resultados de los análisis se muestran en las Figuras 16 y 17.

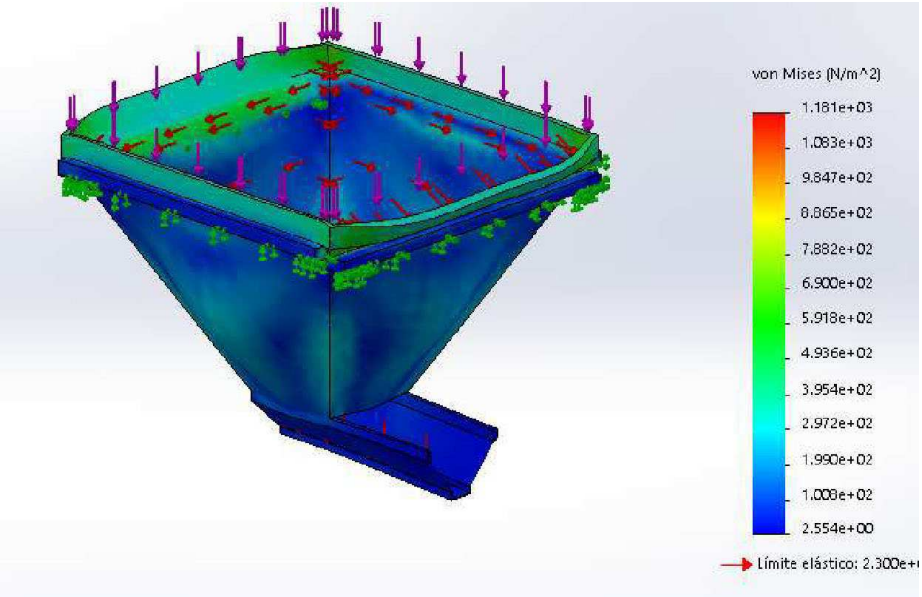


Figura 16. Análisis de tensión.

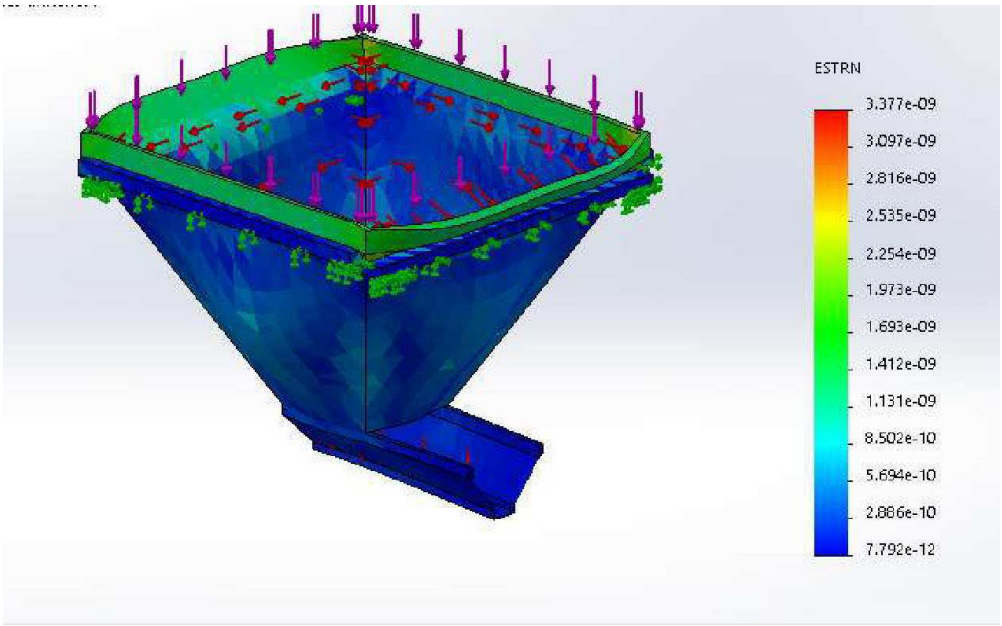


Figura 17. Análisis de deformación.

5.4 Simulación de movimiento del prototipo

Para tener una mejor visión de cómo funciona la abonadora, se llevó a cabo la simulación de movimiento para las llantas, las cuales a su vez transmitirán el movimiento al tornillo sin fin que está ubicado en la tolva para que pueda accionar la fluidez del fertilizante y así ser aplicado al cultivo. También se simuló el movimiento del manubrio el cual dará dirección al prototipo, ver Figura 18.

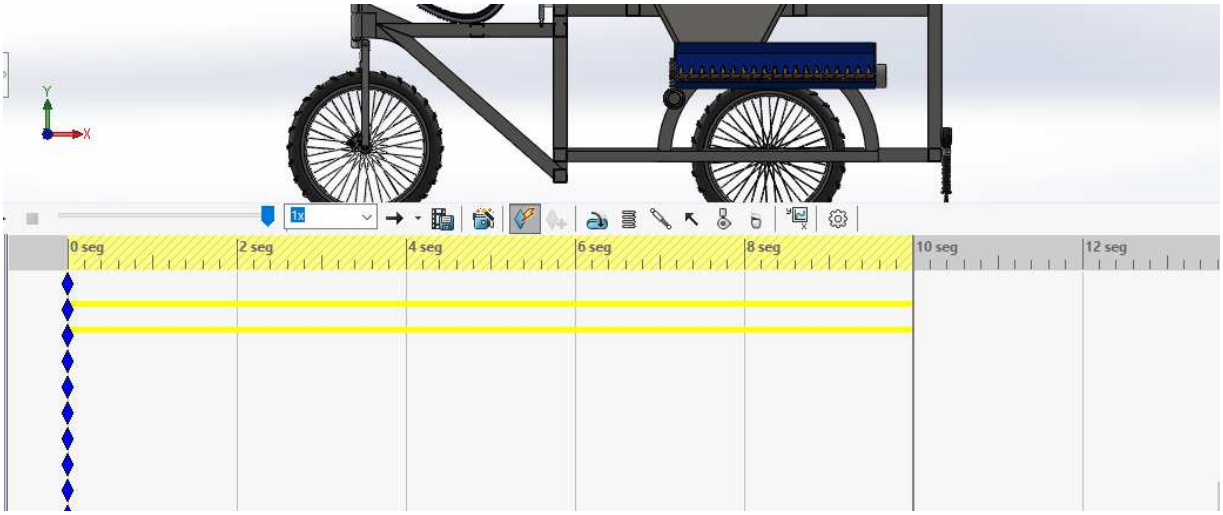


Figura 18. Simulación de movimiento.

5.5 Comparación de costos del prototipo con las abonadoras comerciales

Con base a un presupuesto rápido tomando en cuenta el material para elaborar el chasis y los elementos que estarán acoplados a él y la soldadura, llevará a un costo de $14,160.00 pesos mexicanos más la mano de obra de un herrero y una persona que arme el prototipo consta de $12,000.00 pesos mexicanos llevará a un costo total de $26,160.00 pesos con una variabilidad de más $4,000.00 pesos dependiendo la zona y los proveedores.

Comparando con las abonadoras existentes en el mercado que se asemejan al propósito de evitar que el fertilizante se pierda por volatilización, el prototipo puede ser más rentable económicamente para las parcelas con poca área de producción de una a dos hectáreas y para pequeños productores, ver Figura 19.

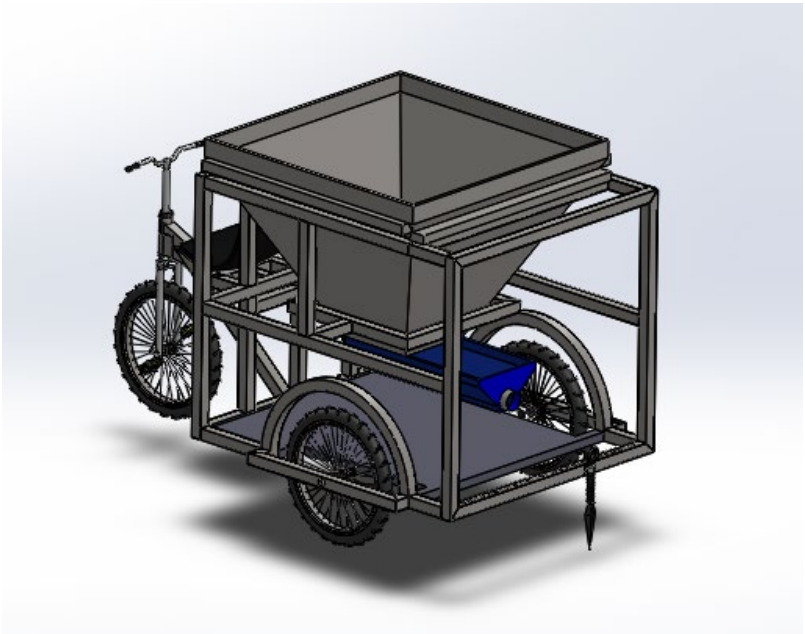


Figura 19. Prototipo de abonadora propuesto.

Las abonadoras existentes en el mercado para adquirirlas, consta de un gasto elevado para los pequeños productores, los precios van desde los $90,000.00 hasta los $200,000.00 y son abonadoras que se acoplan a un tractor agrícola, ver Figura 20.

Figura 20. Abonadoras comerciales.

6. Conclusiones

En el diseño de la máquina se logró obtener mediante toda la información obtenida con el fin de cumplir con el objetivo de obtener un prototipo de una máquina capaz de distribuir abono inorgánico de una manera uniforme eficiente en la forma taparlo para evitar su volatilización.

La máquina abonadora tiene un fácil manejo y no tiene mucha complejidad, lo que permite tener una mayor accesibilidad para cualquier persona. También se implementaron ideas innovadoras para su elaboración, sin duda el prototipo con algo más de tiempo y esfuerzo puede beneficiar mucho el progreso de la agricultura.

La utilización de una máquina de distribución de abono de este tipo es de mucha ayuda para el desarrollo de la agricultura dentro de nuestro país, ya que optimiza el tiempo del proceso de abonado lo cual convierte a la máquina en una buena inversión.

El prototipo ayudará a una actividad clave para el alto rendimiento en el cultivo de caña, claro llevando a cabo un manejo adecuado de todo el proceso para cultivar caña.

Como trabajo futuro se plantea que el diseño de la abonadora, sea evaluado por la Asociación Mexicana de Voluntariado Internacional A.C. (AMVIAC) para realizar ajustes de acuerdo a las necesidades planteadas por la asociación, para finalmente realizar su construcción en físico.

Referencias

[1] Copyright. (13 de Julio de 2017-2021). Tipos de Abonadoras: componentes, como funcionan y principales características. Obtenido de Tipos de Abonadoras: componentes, como funcionan y principales características: https://www.tractoresymaquinas.com/tiposabonadoras-ventajas inconvenientes/

[2] Agroecológicos Arenales. (2014). Agroecológicos Arenales Del campo a tu casa, sin intermediarios. Obtenido de Agroecológicos Arenales Del campo a tu casa, sin intermediarios: https://www.agroecologicos.es/comederos-c102x3864441

[3] Anphibius. (4 de junio de 2020). Abonadoras agrícolas: diferentes tipos y funcionamiento. Obtenido de Abonadoras agrícolas: diferentes tipos y funcionamiento: https://anphibius.com/blog/que-es-una-abonadora-agricola/
[4] Vilcarromero, j. f. (2014). Diseño de una máquina abonadora para distribuir fertilizante inorgánico en terrenos de cultivo de bajo costo. Lima-Perú.
[5] ALEPH. (2021). ¿Qué es la granulometría y para qué sirve? Obtenido de https://aleph.org.mx/que-es-la-granulometria-y-para-que-sirve
[6] Boletín Agrario. (2002). Elementos esenciales de las máquinas abonadoras. Obtenido de Elementos esenciales de las máquinas abonadoras: https://boletinagrario.com/f769,elementos-esenciales-maquinas-abonadoras.html
[7] Prismaker system. (s.f.). Características de una buena abonadora para fertilización en agricultura. Obtenido de Características de una buena abonadora para fertilización en agricultura: https://www.agroes.es/agricultura/abonos/235-caracteristicas-de-una-buena-abonadora-86
[8] ConceptoDefinición. (2011). Motor. Obtenido de Motor: https://conceptodefinicion.de/motor/
[9] CONFIRMADO. (7 de Septiembre de 2020). Velove Armadillo, la bici furgoneta que funciona con hidrógeno. Obtenido de Velove Armadillo, la bici furgoneta que funciona con hidrógeno: http://confirmado.com.ve/velove-armadillo-la-bici-furgoneta-quefunciona-con-hidrogeno/
[10] Láminas y aceros. (2015). ¿Qué es un PTR? Obtenido de ¿Qué es un PTR?: https://blog.laminasyaceros.com/blog/que-es-unptr#:~:text=Los%20PTR%20son%20tubos%20que,porque%20pueden%20ser%20doblados%2C%20soldados.
[11] BAIZ, S.L. (2020). TORNILLO SINFIN: DEFINICIONES Y FORMULAS. Obtenido de TORNILLO SINFÍN: DEFINICIONES Y FÓRMULAS: http://www.baiz.net/es/productos-sinfines-y-coronas/--tornillo-sinfin-definiciones-yformulas#:~:text=El%20c%C3%A1lculo%20de%20las%20dimensiones,%C2%B4%20%3D%202%2C25%20m.
[12] ncTech. (s.f.). ¿Qué es el SOLIDWORKS Simulation? Obtenido de ¿Qué es el SOLIDWORKS Simulation?: https://nctech.com.mx/blog/ingenieria-digital/solidworkssimulation/

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 5, pp. 62 – 73
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Software académico que registra la medición de cuatro sensores MPU6050

Candia García Filiberto, Benítez Cruz Gerardo Alan, Ambrosio Lázaro Roberto Carlos, Flores Méndez Javier, González Contreras Irving

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

Resumen

La finalidad de la salud estructural es determinar la integridad de la rigidez en las estructuras, ya sea de uno, dos o más grados de libertad (1 gdl, 2 gdl o ngdl), cuando se ven afectadas por vibraciones mecánicas aleatorias y no aleatorias. Una problemática al monitorear la salud estructural con prototipos académicos es la baja capacidad para medir y registrar la aceleración de manera comparada con más de dos sensores. El objetivo es programar una interfaz gráfica de usuario funcional e intuitiva desarrollada en Arduino-Simulink-Matlab, para el monitoreo de vibraciones mecánicas en estructuras de más de un grado de libertad, utilizando dispositivos de medición inerciales. Se utiliza una metodología teórica-experimental, basada en el método científico-deductivo, los datos se obtienen mediante la manipulación de una estructura de 2 gdl y el análisis de cuatro señales de aceleración. Como resultado se cuenta con un software académico capaz de mostrar e identificar la adquisición, el tratamiento y análisis de señales de aceleración en una estructura de 2 gdl, mediante tareas automatizadas presentadas al usuario en paneles de botones dentro de la interfaz gráfica, con un diseño intuitivo y simple de utilizar. Se concluye que es factible fabricar para la academia un sistema de bajo costo para el monitoreo de la salud estructural de estructuras de uno o más gdl, mediante dispositivos que realizan la medición de más de dos sensores inerciales.

Palabras clave: Aceleración, Arduino, Medición Inercial, MPU6050.

1. Introducción

La técnica llamada monitoreo de la condición tiene como objetivo predecir la salud de una máquina completa a partir de mediciones en un pequeño número de ubicaciones. En la década de 1970, los investigadores estudiaron la posibilidad de evaluar la integridad de las estructuras a partir de un pequeño número de mediciones en lugares estratégicos como las concentraciones de masa, que definen los modos de vibrar. El trabajo se concentró en mediciones de aceleración, ya que los modos de vibrar son propiedades naturales de toda la estructura, así como también las frecuencias de resonancia son independientes de la posición de la medición, y dependen de la excitación de los modos de vibrar y del punto elegido [1].

El monitoreo de la salud estructural involucra la implementación de un sistema de detección de daños basado en ingeniería para mejorar el diseño de la infraestructura estructural, que tiene aplicación en la industria metalmecánica, aeroespacial, aeronáutica y civil. Debido a que las estructuras se deterioran bajo la acción de algunos eventos aleatorios o permanentes de vibración durante su tiempo de vida útil. Por lo tanto, en la actualidad la identificación y detección de daños se vuelve esencial para tomar medidas preventivas que aseguren la integridad de los usuarios y debe ser de alto interés para la academia en las Instituciones de Educación Superior (IES).

Asimismo, en las IES es común que no se cuente con el equipamiento o dispositivos de más de dos canales, para llevar a cabo el monitoreo de la salud estructural en función de la medición de la

frecuencia natural y la frecuencia de excitación que están involucradas en las propiedades de las estructuras, al variar tanto la masa como la rigidez. Motivo por el cual es limitado el estudio a profundidad sobre el efecto negativo que ocasionan las vibraciones mecánicas, durante la formación profesional de los ingenieros que se dedican al diseño de infraestructura estructural. Esta es una debilidad latente en el currículum que forma a toda una comunidad de profesionistas, ya que lleva a realizar suposiciones y toma de decisiones incorrectas, sobre el cómo optimizar las estructuras, sin poner en riesgo la salud estructural y la integridad física de la comunidad. Poniendo de manifiesto que la falta de un criterio de validez o juicio de valor es indispensable cuando se requiere realizar una modificación a la función original de la infraestructura.

La sistematización y digitalización del monitoreo de la salud estructural puede ser aplicado en estructuras residenciales, comerciales e industriales, por ejemplo: puentes, carreteras, edificios, plataformas petrolíferas, minas, etc. Por lo tanto, para asegurar su óptimo desempeño, se requiere de estudios especializados que involucran la medición y monitoreo de variables como la aceleración, para predecir el comportamiento de dichas estructuras, mejorando el nivel de confiabilidad en las mismas.

Al implementar los sistemas comerciales que ofrece el mercado de la confiabilidad, la solución es extremadamente costosa, de ahí la importancia de desarrollar un sistema de bajo coste y fácil construcción que permita a los estudiantes relacionarse con el área de la salud estructural y, con ello, fomentar el interés en el desarrollo e investigación de la tecnología multidisciplinaria. Siendo posible poner al alcance de la población en general los beneficios que ofrece el monitoreo de la salud estructural, mediante dispositivos de fabricación propia o académica y modelos a escala que representan interpretaciones de la realidad y que requiere de apoyos visuales para una rápida identificación de los parámetros fuera de rango.

Por medio del método científico al desarrollar una interfaz gráfica, se busca correlacionar el comportamiento de una estructura de más de 1 gdl, que mediante la excitación de sus elementos y por medio de acelerómetros sean registradas las respuestas a dichas excitaciones. Posteriormente se obtiene el espectro de frecuencias, que permite calcular la respuesta del sistema para determinar el desplazamiento de los elementos estructurales. Sistematizar dicha tarea utilizando una interfaz gráfica diseñada específicamente para analizar la información de cuatro canales de medición, permite que el proceso se realice de manera rápida y eficiente.

Comprender la importancia del monitoreo de la salud estructural a través del análisis de múltiples señales de aceleración, es una aplicación inmediata del procesamiento digital de señales y del uso de microcontroladores en la academia. Al aprender con prototipos funcionales que se diseñan como soluciones de bajo coste a problemáticas complejas de salud estructural. Esta posibilidad lleva a preguntar si es posible modelar prototipos que en años próximos sean tendencia debido al rápido crecimiento tecnológico del entorno y de los problemas de seguridad en la infraestructura que esto implica.

Al comprender el uso de parámetros como la frecuencia natural del sistema y la frecuencia normal de operación, se pueden interpretar correctamente las gráficas que permiten realizar juicios y predecir el comportamiento de las estructuras basados en los valores de referencia que sean analizados mediante este tipo de procedimientos e interfases.

Se concluye que las aportaciones realizadas por este proyecto en cuanto al monitoreo de múltiples señales de aceleración, por medio de un software académico desarrollado en el interior de las IES, permite proponer sistemas de bajo costo para vigilar la salud estructural de modelos de más de 1 gdl, evaluado en términos de pérdida de la rigidez, que se determina a través del análisis de la frecuencia del sistema. Siendo posible desde la academia transferir y aplicar la tecnología relacionada a las vibraciones mecánicas para la prevención de riesgos públicos bajo la filosofía del monitoreo de la salud estructural.

2. Método

La metodología es teórica-experimental, basada en el método científico-deductivo, los resultados se obtienen mediante la adquisición de señales de aceleración y el análisis digital de las muestras en una aplicación desarrollada en Arduino-Simulink-Matlab, los datos se comparan observando el comportamiento con respecto a la frecuencia, el periodo natural y la respuesta dinámica de la estructura.

El diseño de la investigación se establece como procedimental-secuencial y en cada apartado se define y precisa la intención académica, que permite documentar la experiencia a favor del proceso enseñanza-aprendizaje en las IES, sin depender de dispositivos comerciales de costo excesivo, para ello los pasos se enuncian como:

1. Configurar la estructura a estudiar.
2. Asignar materiales y conforme a sus propiedades físicas y mecánicas.
3. Establecer las condiciones y precarga de las conexiones de sujeción.
4. Determinar la frecuencia natural de la estructura.
5. Adquirir y registrar los datos mediante gráficas y archivos de texto.
6. Aplicar la FFT a las muestras de aceleración adquiridas.
7. Analizar las funciones de la respuesta en frecuencia.
8. Cuantificar los valores máximos de:
    a) Frecuencia
    b) Amplitud
9. Diseñar la interfaz gráfica para almacenar, cargar y sistematizar el proceso de adquisición-análisis de las vibraciones muestreadas.
10. Correlacionar el estado operativo de la estructura de ngdl, con respecto a los valores de riesgo en función de los desplazamientos.

Siendo los fundamentos del método científico-deductivo la base del diseño de la investigación, el alcance de esta es descriptiva-correlacional. El interés radica en describir de forma precisa la experimentación, para correlacionar las variables que afectan la salud estructural. El proceso educativo implica el análisis de las vibraciones y su efecto en estructuras de más de 1 gdl, cuando se someten a vibraciones aleatorias y no aleatorias.

Diversas interpretaciones sobre el monitoreo de la salud estructural pueden ser referidas por cada profesionista con base a su experiencia, por lo tanto, para no ser ambiguos en el concepto se hace referencia a las definiciones de los siguientes autores:

- El monitoreo de la salud estructural se ocupa de la detección, identificación y evaluación en tiempo real de la evolución de la seguridad y el rendimiento de las estructuras [2].
- El monitoreo de la salud estructural es el seguimiento de las características estáticas o dinámicas de una estructura para identificar y localizar reducciones de rigidez para la detección de daños. Se utilizan diferentes indicadores de daños y cualquier indicador presenta ventajas y desventajas [3].
- El monitoreo de la salud estructural permite detectar daños en una etapa temprana, seguir su evolución y ayudar a reducir los costos y el tiempo de inactividad asociados con la reparación de condiciones peligrosas antes de una falla [4].
- Una técnica de detección de daños es una parte esencial de cualquier sistema de monitoreo de la salud estrucural. Su alcance consiste en la identificación de algunos parámetros estructurales y ambientales que deben ser monitoreados regularmente durante la operación de la máquina. Un daño puede verse como un cambio en el material y/o las propiedades geométricas de una estructura, incluida la variación de las condiciones de contorno y las conexiones estructurales [5].

El resultado de la revisión del estado del arte del monitoreo de la salud estructural permite deducir que el desarrollo y la aplicación de tecnologías de detección innovadoras, así como las tecnologías relacionadas de procesamiento de señales y análisis de datos y que pueden ser transferibles desde la

formación en los niveles de pregrado y grado en ingeniería a favor de promover a gran y pequeña escala el avance de la tecnología del monitoreo de la salud estructural, para una mejor evaluación del estado estructural, de seguridad y predicción de rendimiento [6].

Para el desarrollo del software académico se utiliza el software de autor Matlab [7], que es el eje principal en la creación de la interfaz gráfica y en el análisis digital de las muestras de aceleración. Además, se encarga de cargar y almacenar los valores que son detectados mediante los acelerómetros MPU6050 y cuya señal se acondiciona mediante la placa Arduino UNO y posteriormente calcular la respuesta dinámica de las estructuras.

En el modelo de la estructura que permite estudiar las vibraciones mecánicas y sus efectos, se utilizó el software Siemens NX, que es un recurso tecnológico de tipo CAD/CAM/CAE, donde se dibujó la estructura en la cual se colocan los acelerómetros (figura 1). Los elementos del modelo CAD se fabricaron mediante la impresión 3D, constituyéndose también como una parte importante del desarrollo del proyecto, que implica la aplicación de las tecnologías de manufactura que muestran ser redituables para el desarrollo rápido de prototipos didácticos útiles en instituciones de educación superior, para el estudio de las vibraciones mecánicas.

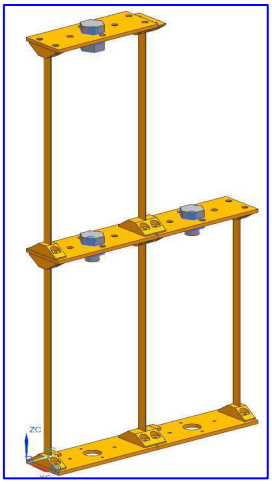


Figura 1. Estructura impresa en 3D para el estudio de las vibraciones.

Como al desarrollar el modelo de la estructura se utilizó el software SIEMENS NX, siendo la herramienta principal para el dibujo de las placas y los elementos de sujeción que conforman la estructura donde serán posicionados los módulos MPU6050 (figura 2). Se hace necesario materializar el modelo digital a un modelo físico.

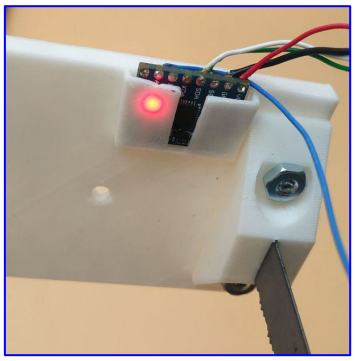


Figura 2. Sensores fijados a la estructura impresa en 3D.

La impresión 3D, conocida como manufactura por adición o deposición por material fundido, es una tecnología que integra un conjunto de procesos que producen objetos tridimensionales y físicos a través de la adición de material plástico en capas que corresponden a las sucesivas secciones transversales de un modelo digital en 3D. Siendo los plásticos y las aleaciones de metal los materiales más usados para impresión 3D [8].

La concentración de masa se representó por la incorporación de tornillos estructurales que proporcionan cada uno un peso de 0.160 kilogramos (figura 3), masa suficiente y proporcional a la rigidez de las columnas 2.59 kgf*m.

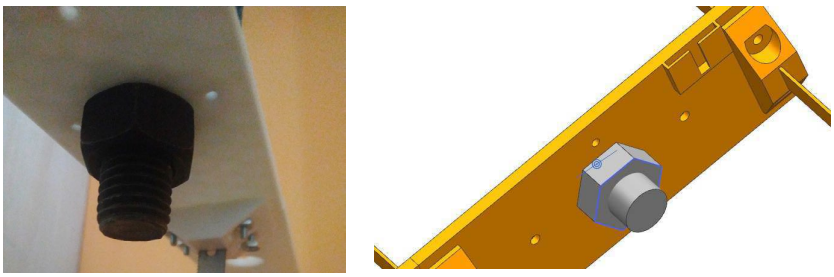


Figura 3. Representación física y digital de masa concentrada.

Comprender la integración tecnológica (figura 4) para analizar cuatro señales de manera simultánea, requiere del conocimiento de los elementos que la integran, ya que permiten la mejor ejecución del sistema.

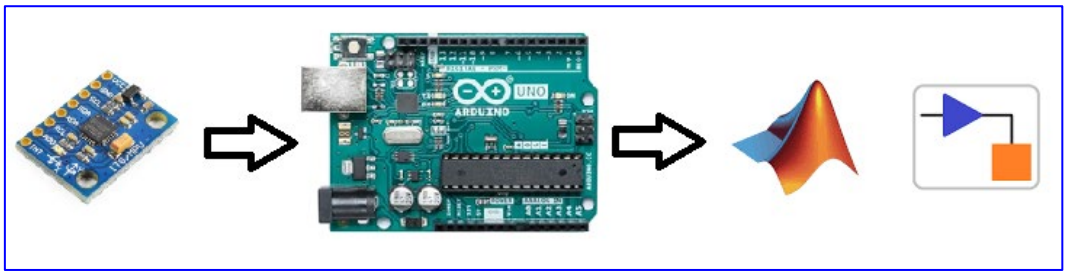


Figura 4. Integración tecnológica para la adquisición de señales.

MATLAB es un software de programación y cálculo numérico especializado para análisis de datos, desarrollo de algoritmos y creación de modelos que incluye un lenguaje de programación propio [7]. Entre sus múltiples implementaciones, destaca la facilidad al crear interfaces de usuario mediante App Designer, así, como la capacidad de procesamiento numérico que hace posible el análisis digital de señales. En cuanto a Simulink es un entorno para diseño de sistemas basado en diagramas de bloque dentro de MATLAB, permite crear sistemas con modelos multidominio, realizar simulaciones previo a implementaciones en hardware y programar comportamientos de los sistemas [9] sin necesidad de escribir código.

Arduino es una plataforma de código abierto [10], las placas Arduino son de bajo coste, por lo que representan una opción viable en el desarrollo de proyectos, aunado a un entorno de programación sumamente documentado. Al ser un software open-source, las capacidades nativas del entorno de programación pueden ampliarse mediante la descarga de librerías de terceros, ampliando el alcance de las aplicaciones, entre sus limitaciones se encuentra la capacidad de trabajar en paralelo solo dos sensores mediante el protocolo de comunicación I2C.

El protocolo I2C (Inter-Intergrated Circuit) es un protocolo de comunicación síncrono, que utiliza dos líneas de transmisión, uno para el reloj (SCL) y otro para datos (SDA). Es un protocolo de direccionamiento, por lo que los dispositivos conectados por este método tienen una dirección única de

7 bits para cada uno, estos se diferencian entre dispositivos maestros y dispositivos esclavos [11]. Debido al direccionamiento que utiliza este protocolo y las rutas utilizadas por los acelerómetros MPU6050 (0x68 y 0x69), la conexión de múltiples dispositivos es compleja, y deja de ser una opción viable para el desarrollo del proyecto, por lo que se utiliza el protocolo de comunicación serial.

La comunicación serial permite la transmisión y recepción bit a bit de un byte completo, este tipo de comunicación es usado para la transmisión de datos en formato ASCII. Para ello se utilizan 3 líneas de transmisión: referencia (tierra), recepción y transmisión. Las velocidades de transmisión comunes (Baud Rate) son 4800, 9600 y 115200 baudios, se pueden utilizar velocidades más altas, pero la distancia máxima entre dispositivos a comunicar se vería afectada negativamente [12]. La comunicación de dispositivos por este método es asíncrona, lo cual permite que puedan enviar datos por un lado y recibir datos por otra vía al mismo tiempo, a comparación del protocolo I2C, que se realiza de manera síncrona.

La adquisición de los registros de aceleración requiere de sensores que permitan la transmisión en tiempo real con un tiempo de muestreo corto, con el fin de evitar pérdidas de información relevante durante la toma de muestras. El acelerómetro MPU6050 representa una opción viable ya que es una unidad de medición inercial de 6 grados de libertad, combinando un acelerómetro y un giroscopio de 3 ejes en un solo chip, además de integrar un procesador digital de movimiento (DMP) capaz de realizar algoritmos complejos de captura de movimiento de 9 ejes [13]. El rango de trabajo del sensor comprende una escala programable de 250-2000 grados/segundo para el giroscopio y de 2g/4g/8g/16g para el acelerómetro, utilizando una alimentación de 3.3 V o 5 V.

En la figura 5, se aprecia la conexión requerida para la comunicación entre los sensores MPU6050 y la placa Arduino UNO, la conexión se describe en la tabla 1. Para recolectar muestras de aceleración confiables, los elementos deberán estar unidos de manera que los movimientos involuntarios no provoquen desconexiones entre los sensores y la placa Arduino UNO, es necesario verificar que estén realizadas adecuadamente para evitar lecturas erróneas en los valores de aceleración detectados, las micro desconexiones afectarán negativamente a los registros enviados al software desarrollado para la adquisición y tratamiento de los datos. Es importante que la placa sea conectada al equipo de cómputo desde antes que se inicie el software, para evitar problemas con el puerto serial.

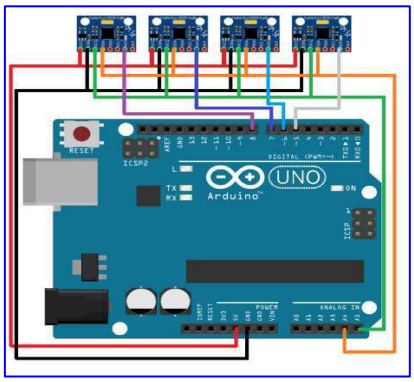


Figura 5. Diagrama de conexiones Arduino Uno y cuatro MPU6050.

El aporte teórico de este proyecto se fundamenta en la ecuación de movimiento para ngdl (ec. 1) se presenta en forma compacta y su forma representa la ecuación de movimiento matricial para el caso de la vibración forzada.

$$\underline{M}\ddot{\underset{\sim}{Y}}(t) + \underline{K}\underset{\sim}{Y}(t) = \underset{\sim}{F}(t) \qquad (1)$$

Donde:

$n =$ Grados de libertad
$\underline{M} =$ Matriz de masas tamaño (nxn)
$\ddot{\underset{\sim}{Y}}(t) =$ Vector de aceleración (nx1)

$\underline{K} =$ Matriz de rigidez (nxn)
$\underset{\sim}{Y}(t) =$ Vector de desplazamientos (nx1)
$\underset{\sim}{F}(t) =$ Vector de fuerzas (nx1)

Tabla 1. Descripción de los pines de conexión.

Elemento	PIN Correspondiente
Sensor 1 (PIN AD0)	5
Sensor 2 (PIN AD0)	6
Sensor 3 (PIN AD0)	7
Sensor 4 (PIN AD0)	8
SCL	A5
SDA	A4
VCC	5V
GND	GND

3. Resultados

En el desarrollo del sistema que permite: adquirir, acondicionar, analizar y visualizar señales de aceleración se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- El tipo de señales que el sistema debe ser capaz de detectar.
- La recolección, el tiempo y la sistematización del tratamiento de los datos.
- El análisis de los datos resultantes.
- La interacción entre el usuario y la interfaz gráfica.
- La validación de los resultados.
- La toma de decisiones a partir de los resultados obtenidos.

En el panel de la adquisición y guardado de datos (figura 6), mediante el uso de la interfaz, es posible procesar la información de las señales obtenidas por los acelerómetros de dos maneras distintas: recolectando nuevas muestras mediante la ejecución de una simulación, o cargando datos que hayan sido guardados con anterioridad de simulaciones anteriores, la secuencia para el tratamiento de los datos no se modifica.

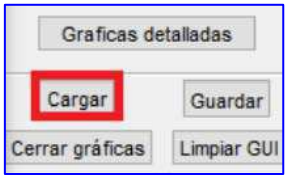


Figura 6. Panel de adquisición de datos.

Al adquirir nuevas muestras, es importante asegurar que la conexión de los sensores y la placa Arduino se encuentre conectada antes de iniciar la corrida del software. El control de la simulación es intuitivo para el usuario, únicamente es necesario esperar que se abra una ventana que muestre la adquisición de los datos de aceleración en tiempo real, y se debe pulsar el botón “Parar” cuando desee finalizar la recolección de los datos (figura 7).

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 5, pp. 62 – 73
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

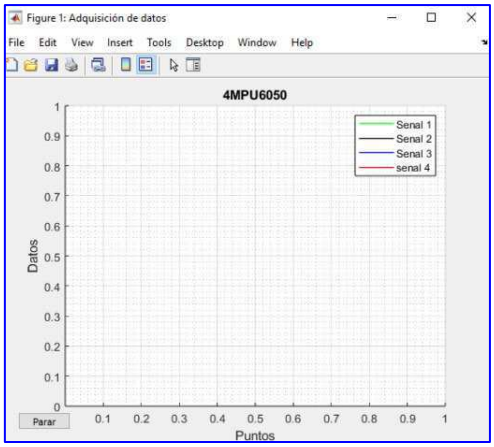


Figura 7. Ventana de adquisición de datos.

Se accede al panel de visualización de resultados de aceleración y de la transformada rápida de Fourier (FFT) dentro de la interface, una vez que se hayan obtenido muestras, ya sea por la ejecución de una simulación reciente o por la recuperación de datos previos, y después de haber dado clic en el botón “Confirmar adquisición de datos”, los resultados podrán ser visualizados dentro de la App, dando clic en los botones dentro de los subpaneles (figura 8).

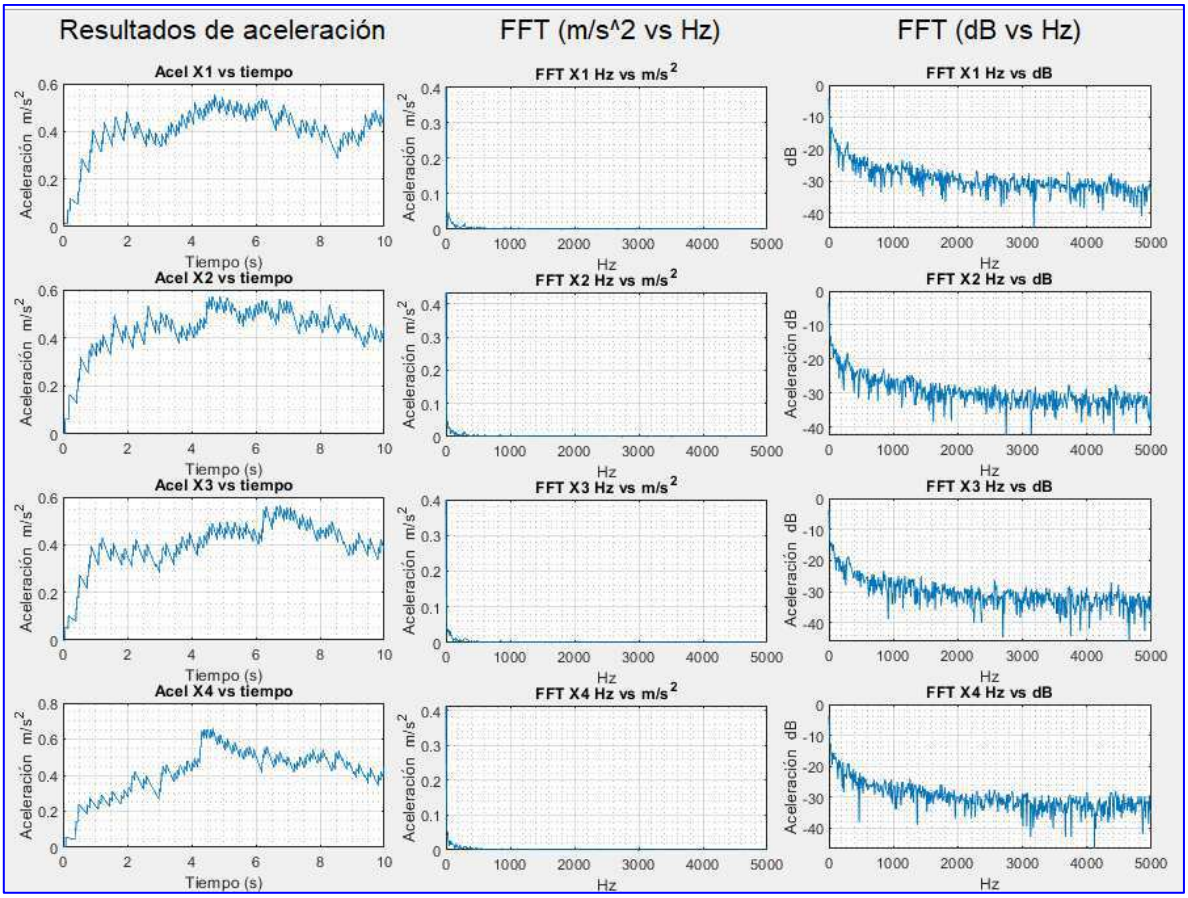


Figura 8. Panel completo de visualización de datos.

El subpanel “Aceleración y FFT” mostrará los resultados de aceleración y de la transformada rápida de Fourier para el eje especificado en el botón en los 4 sensores. Los subpaneles “Aceleración” y “FFT” mostrarán los resultados de cada eje para cada sensor de manera independiente en caso de que se requiera analizarlos por separado. Las gráficas se visualizarán dentro de la App, mostrando una vista rápida de los resultados, si se requiere analizar a profundidad, se hará uso del panel “Gráficas detalladas”

La visualización de resultados de aceleración y FFT en ventanas independientes, esta sección se habilita en la sección previa, la visualización de los resultados únicamente será funcional después de dar clic en el botón “Confirmar adquisición de datos”. Los resultados se mostrarán fuera de la GUI, en ventanas independientes según se activen los botones de los subpaneles correspondientes, el funcionamiento es el mismo que en el panel anterior, con la diferencia de que, con estos botones, los resultados podrán observarse con mejor detalle o ser guardados con las opciones predeterminadas en la generación de figuras que Matlab predispone al desplegar gráficas. Los resultados podrán mostrarse por separado para cada eje, o si se da click en el botón “Graficar todas” se desplegarán 6 ventanas con los resultados para cada eje, en cada sensor (figura 9).

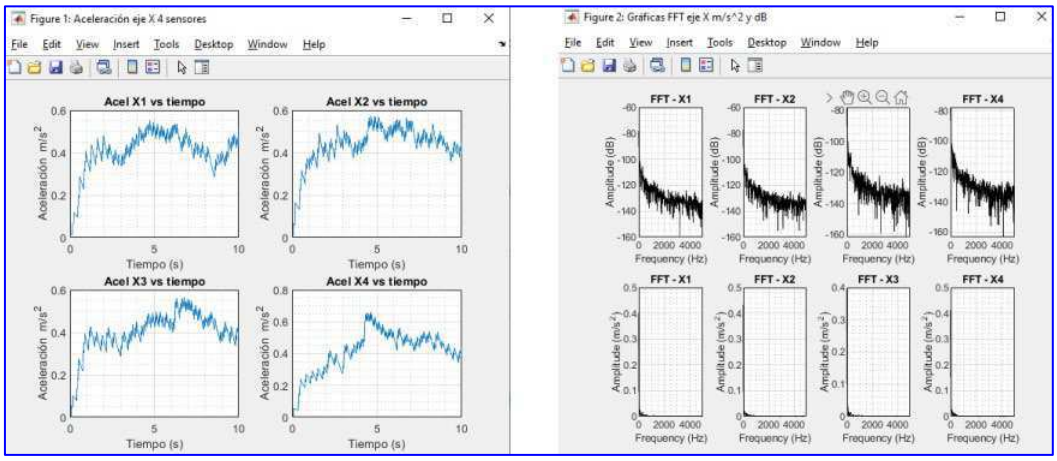


Figura 9. Panel de visualización de resultados en ventanas independientes.

Después de graficar los resultados de los valores de aceleración, para obtener la respuesta de las señales de aceleración se utiliza el panel “Simular respuesta”. Los resultados de esta simulación podrán mostrarse en ventanas independientes o dentro de la App, despues de ejecutarse en simulink el diagrama de bloques que determina la respuesta dinámica de cada medición (figura 10).

Entre las pruebas previas que se realizaron, se utilizó el protocolo I2C para obtener los datos de los acelerómetros, debido a que hay más documentación sobre este método de adquisición con los sensores MPU6050, sin embargo, este se ve limitado a obtener únicamente datos confiables al conectar únicamente dos sensores. Al intentar la adquisición de cuatro sensores a la vez mediante este método, las simulaciones no se ejecutan, o muestran lecturas nulas.

Por lo que se decidió continuar con la adquisición de los datos mediante el puerto serial, aunque utiliza más recursos del equipo, la comunicación entre los cuatro sensores, la placa Arduino Uno y el software, se realiza de manera adecuada. Hace falta documentación sobre la adquisición de los datos de acelerómetros MPU6050 con conexiones de este tipo, la mayoría de las referencias en internet utilizan únicamente un sensor, lo cual no es suficiente para recolectar valores que sean significativos a la hora de realizar las simulaciones que se hicieron con el modelo propuesto.

Aunque existen multiplexores para utilizar el protocolo I2C en la comunicación entre Arduino y los sensores mpu6050 para utilizar más de dos de ellos, la documentación es muy escasa con respecto a este tipo de dispositivos, y aunque en teoría deberían funcionar normalmente, las lecturas que se toman con sensores mpu6050 conectados con multiplexores I2C suelen tener mucho ruido y los resultados se

vuelven poco relevantes. Quizá en investigaciones posteriores la adquisición de señales mediante protocolo I2C con acelerómetros mejore, sin embargo, por el momento el protocolo serial es la mejor opción ante la inconsistencia en los resultados que puede otorgar utilizar multiplexores I2C con Arduino.

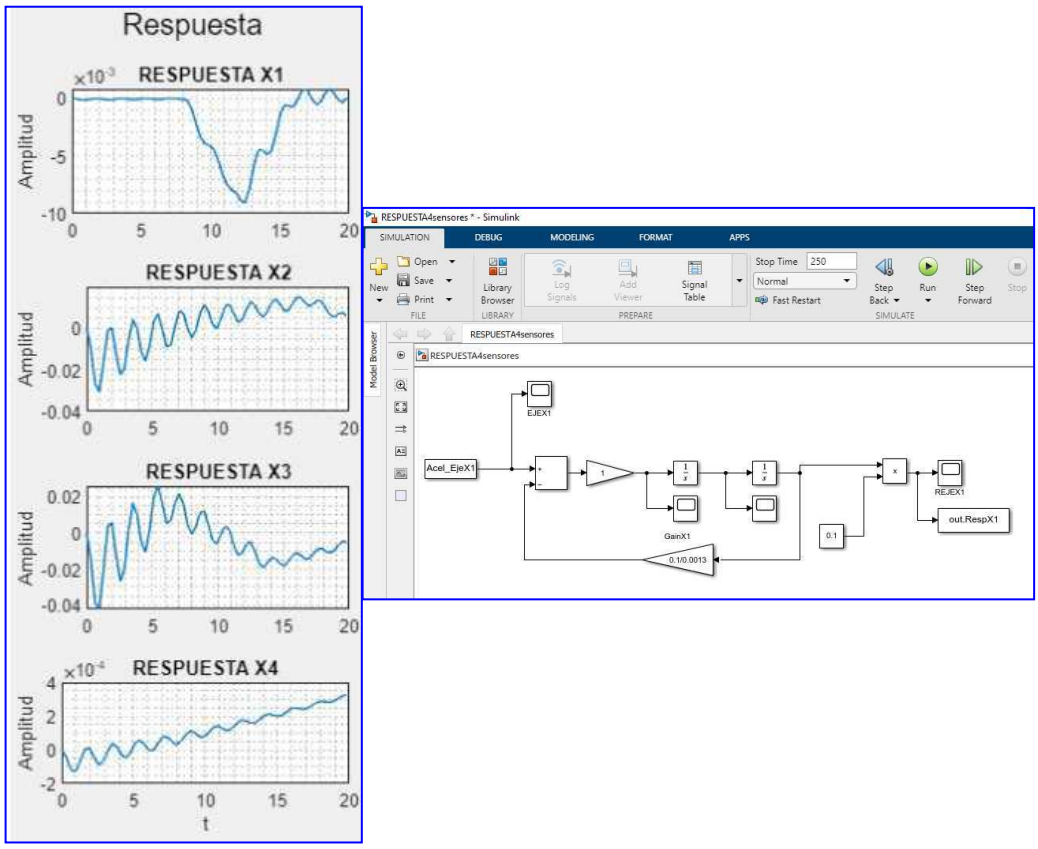


Figura 10. Modelo de obtención de respuesta dinámica en Simulink para los 4 sensores.

El monitoreo de salud estructural aún está en vías de desarrollo a comparación del monitoreo del estado de máquinas rotativas por medio de análisis de vibraciones, debido a que se había abandonado por mucho tiempo el estudio de esta área, sin embargo, los avances en la fabricación de hardware y equipos que pueden utilizarse para esta tarea han despertado el interés de más investigadores en esta área y recientemente se han realizado avances significativos.

La tendencia actual apunta a que combinar el monitoreo de la salud estructural con software que permita validar los resultados u optimizar modelos digitales realizados en software CAD/CAM/CAE, que será cada vez más común en un futuro, no obstante, el equipo existente en el mercado para el monitoreo de salud estructural (en el caso de acelerómetros) no es asequible para todos y aún existen pocas empresas dedicadas a este segmento; entonces es necesario que empiece a contemplarse dentro de la formación de los ingenieros, una revisión más profunda del monitoreo de salud estructural, a falta de personal capacitado en esta área, conocer sus aplicaciones pondría en ventaja a los egresados de dichas licenciaturas.

Un ejemplo visual del funcionamiento integrado del software y la interface se puede visualizar al consultar el enlace: https://drive.google.com/file/d/1l1vglh3Gainuxj1_5Pzn0gGtNlr65qRm/view.

4. Con clusiones

Como conclusión se identifica que la implementación de sistemas de monitoreo de salud estructural en instituciones de educación superior es viable, debido al rápido crecimiento demográfico que se experimenta en la actualidad, y en consecuencia, el proceso de urbanización se ha acelerado exponencialmente, incrementando el requerimiento de personal capacitado que pueda asegurar la integridad de las edificaciones cada vez de mayor altura que requieren de inspecciones y mantenimiento constante de manera eficiente y segura, debido a que están expuestas constantemente a los daños provocados por eventos de vibración, deslizamientos de tierra, impactos directos, envejecimiento, factores ambientales como la humedad, inundaciones, entre otros.

Esto hace que, formar ingenieros que sean conscientes de la existencia de técnicas no destructivas para la evaluación del estado de una estructura sea de vital importancia para salvaguardar las edificaciones y las vidas humanas, al utilizar el monitoreo de la salud estructural como una herramienta más para asegurar la elaboración de proyectos de construcción y diseño de estructuras que sean eficientes.

La finalidad del sistema creado es que los estudiantes de ingeniería puedan identificar de mejor manera la aplicación de conceptos relacionados con los parámetros involucrados en la integridad de las estructuras de más de un grado de libertad (masa y rigidez) y cómo estos influyen en el comportamiento de las señales captadas por los acelerómetros, así como estos pueden ayudar en el análisis del estado en que se encuentran las estructuras mencionadas, respaldadas por el tratamiento digital de señales y de las normas establecidas, enriqueciendo el perfil de los egresados de estas áreas en las instituciones de educación superior.

Si bien el sistema presentado es a nivel didáctico, el saber interpretar correctamente los resultados que se muestran en la interfaz, así como la elaboración de diagnósticos basados en los espectros de vibración obtenidos y la comunicación adecuada de los resultados, fomentará en los alumnos la búsqueda e interés por la investigación en pro del desarrollo de dicha tecnología como un complemento que podría marcar una diferencia significativa en el entorno al que se enfrentarán en un futuro donde la urbanización cambiará de forma drástica los estándares de seguridad y mantenimiento requeridos para la ejecución de proyectos de construcción.

Con el presente trabajo, se contribuye al progreso en la investigación del potencial del monitoreo de la salud estructural, poniéndolo al alcance de los estudiantes y docentes que pueden replicar fácilmente el sistema y hacer uso de la interfaz para comenzar a comprender el comportamiento de las estructuras, predecir y elaborar diagnósticos con los resultados, incentivando en los alumnos el interés en el monitoreo y ayudándolos a comprender mejor cómo la variación en las frecuencias de sistemas de más de 1 gld pueden mostrar si hay condiciones de operación inseguras, si algún diseño requiere de una revisión más profunda, así como de proporcionar una herramienta más a las ya existentes para la evaluación y mantenimiento de sistemas similares.

Como trabajos de investigación futuros relacionados con el desarrollo de la interfaz creada, se busca optimizar el filtrado de los datos obtenidos y la mejora en lo que a comunicación serial entre dispositivos se refiere, así como actualizaciones posteriores para mejorar el rendimiento del programa que, aunque es funcional, se sigue investigando para alcanzar en algún momento un rendimiento más óptimo, así como una depuración exhaustiva en la programación de la interfaz, ya que debido a las funciones que se le fueron integrando, el código del programa resultó muy extenso.

Referencias

[1] P. Cawley, «Structural health monitoring: Closign the gap between research and industrial deployment,» Structural Health Monitoring, vol. 17, nº 5, pp. 1225-1244, 2018.
[2] B. Yuequan y C. Zhicheng, «The State Of the Art Data Science and Engineering in Structrual Health Monitoring,» Engineering, vol. 5, nº 2, pp. 234-242, 2019.

[3] S. Schommer y V. Nguyen, «Model updating for structural health monitoring using static and dynamic measurements,» Procedia Engineering, vol. 199, nº 1, pp. 2146-2153, 2017.
[4] A. Sabato y C. Niezrecki, «Wireless MEMS-Based Accelerometer Sensor Boards for Structural Vibration Monitoring: A Review,» IEEE Sensors Journal, vol. 17, nº 2, pp. 226-235, 2017.
[5] E. Lorenzo, S. Manzato y B. Peeters, «Structural Health Monitoring strategies based on the estimation of modal parameters,» Procedia Engineering, vol. 199, nº 1, pp. 3182-3187, 2017.
[6] T. Chan, J. Li y C. Caprani, «Structural Identification and evaluation for SHM applications,» Journal of Civil Structural Health Monitoring, pp. 719-720, 2018.
[7] MathWorks, «MATLAB,» marzo 2022. [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/products/matlab.html.
[8] Autodesk Inc., «3d-printing,» 2022. [En línea]. Available: https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/3d-printing.
[9] MathWorks, «Simulink,» 2022. [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/products/simulink.html.
[10] Arduino, «Arduino,» 2022. [En línea]. Available: https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction.
[11] E. Rivero, «Communications of embedded systems using the IEEE 802.15.4,» La Laguna, 2018.
[12] Tecnológico Nacional de México, «Apuntes de materias,» 24 mayo 2022. [En línea]. Available: http://www.itq.edu.mx/carreras/IngElectronica/archivos_contenido/Apuntes%20de%20materias/CDC1203_DSP/1_Senales_&_Sistemas.pdf.
[13] Naylamp Mechatronics, «Naylamp Mechatronics,» 2021. [En línea]. Available: https://naylampmechatronics.com/sensores-posicion-inerciales-gps/33-modulo-mpu6050-acelerometro-giroscopio-i2c.html.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 6, pp. 74 - 85
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Sistema mecatrónico auxiliar en el tratamiento del trastorno por déficit de atención/hiperactividad mediante neurofeedback

Pérez Martínez Tania Jareth[1], Jiménez Garibay Alonso Alejandro[2], Palacios Campos José Guadalupe Uriel[3]

Tecnológico Nacional de México en Celaya
M2203030@itcelaya.edu.mx

Resumen

Este artículo presenta una investigación de aplicación de Mecatrónica Médica mediante el desarrollo de un sistema mecatrónico que ofrece una alternativa para el tratamiento del Trastorno de Déficit de Atención/Hiperactividad - TDAH, utilizando Neurofeedback - NF. Con una integración de dispositivos open-source para la adquisición de señales electroencefalográficas. La variable de interés se asocia con el ritmo cerebral beta y su relación con el nivel de concentración durante una prueba específica en el tratamiento del TDAH. La innovación recae en la metodología propuesta, debido a que el paciente ejecuta una prueba estandarizada de un tratamiento para TDAH, se guarda su registro analógico cerebral, se acondiciona la señal eléctrica y se reproduce a manera de una atracción visual o física por medio un sistema mecatrónico controlado por la señal cerebral obtenida. Con los registros, el profesional de la salud puede crear un historial de los avances en la rehabilitación cognitiva y con ello proponer nuevos sistemas mecatrónicos controlados que sirvan como auxiliares en el tratamiento del TDAH, donde el resultado esperado es la motivación intrínseca que se despierta en el paciente ante un estímulo visual o físico.

Palabras clave: Sistema Mecatrónico, Trastorno por Déficit de Atención/Hiperactividad, Neurofeedback.

1. Introducción

El concepto de Mecatrónica Médica ha permeado en todos los ámbitos del sector salud y puede definirse como la integración de tecnología y conocimiento desde varios campos. Incluyendo la fusión de sensado de bioseñales, análisis de datos clínicos en tiempo real, diseño de sistemas mecánicos y eléctricos, desarrollo de robots para la asistencia en rehabilitación, algoritmos para imitar el cuerpo humano como machine o deep learning, etc. Uno de los campos que actualmente se ven beneficiados por la integración de tecnología es el área de fisioterapia y rehabilitación física o cognitiva. Dentro de lo cognitivo, el TDAH presenta oportunidades en el desarrollo de herramientas tecnológicas que permitan motivar al paciente a lograr los objetivos del tratamiento de rehabilitación cognitiva con ayuda de técnicas de biofeedback.

El TDAH surgió en el siglo XX como un problema de Salud Pública Mundial, que según el Dr. Eduardo Javier Barragán Pérez, jefe del Departamento de Neurología del Hospital Infantil de México Federico Gómez (2017), representa el padecimiento más sobre y sub diagnosticado por la complejidad de su evaluación y atención al tratarse de un proceso multimodal e individualizado.

Considerada como un código de la Organización Mundial de la Salud, la Clasificación Estadística Internacional de Enfermedades y Problemas Relacionados con la Salud, divide y clasifica enfermedades, trastornos y lesiones según sus características o causas. Dentro su clasificación,

posiciona al TDAH dentro del grupo de trastornos hipercinéticos-cognitivos que se expresan en una edad precoz. Que se acompaña de un comportamiento hiperactivo y carente de modulación y de una destacada falta de atención y de constancia respecto a tareas. Todas estas características aparecen en varios ámbitos de la vida del paciente y persisten aún con el paso del tiempo [1].

Por otro lado, considerado como la clasificación publicada por la Asociación Panamericana de Psiquiatría, el Manual de Diagnóstico y Estadístico de los Trastornos Mentales, representa una guía para el diagnóstico de los trastornos de salud mental tanto en niños como adultos. Y define el TDAH como un trastorno de neurodesarrollo que se caracteriza por inatención en categorías altas, desorden e impulsividad o hiperactividad [2].

Como dato importante, aunque se ha informado que su prevalencia a nivel mundial oscila entre el 1% hasta casi un 20% en niños de edad escolar. Polanczyk, et. al. en su trabajo *"The Worldwide Prevalence of ADHD: A Systematic Review and Metaregression Analysis"* en el 2007, revisaron literatura por medio de cuatro estrategias: búsqueda en bases de datos especializadas, revisión de libros de texto especializados, contacto con expertos y revisión de listas de referencia, y concluyeron con un porcentaje de 5.3% en 2007, dato sin considerar a los no diagnosticados. Lo que representa un porcentaje importante relacionado con el impacto en niños [3].

Mientras que entre 2017 y 2019 en México se estimó que de 33 millones de niños que conforman la población infantil, alrededor del 15% fueron diagnosticados con algún problema de salud mental y presentan de manera parcial o total los síntomas del TDAH y solo el 5% del total de los infantes fueron oficialmente diagnosticados [4].

El TDAH llega a considerarse un problema de poca importancia debido a su baja prevalencia, pues estudios han demostrado que únicamente el 25% de los padres de pacientes con síntomas del trastorno decidieron que sus hijos requerían atención médica y dentro de este porcentaje, sólo el 13% buscó servicios de salud mental [5]. Sin embargo, impacta de manera negativa si no es diagnosticado, debido a que llega a perdurar incluso en la edad adulta. Si se consideran las múltiples deficiencias que causa, debe recibir un tratamiento multimodal planificado que aborde las necesidades psicológicas, conductuales y ocupacionales o educativas del paciente y su familia.

Entre las diferentes formas de tratamiento hoy en día, se revisan alternativas farmacológicas y no farmacológicas, el NF corresponde a la última categoría. El NF se define como un tratamiento que basa su principio en la adquisición de ondas cerebrales para permitir a la persona ser consciente de su actividad cerebral y modificarla. Por medio de electroencefalografía -EEG, los sistemas de NF extraen una serie de características de las señales para evaluar la función bioeléctrica. Derivada de la evaluación, la actividad cerebral se procesa y acondiciona para convertirse en niveles analógicos que sean utilizados como medio de control en un sistema mecatrónico. Esta investigación incluye la técnica de NF como señal de control de un sistema mecatrónico. La integración tecnológica propuesta pretende ser un auxiliar para que el profesional en la salud (psicopedagogo) registre los ritmos cerebrales obtenidos durante una prueba específica de un tratamiento de TDAH. Específicamente aquellos que están relacionados a estados de alerta, atención y/o concentración, ubicados en la parte frontal del cerebro.

2. Antecedentes

En las últimas décadas la posibilidad de diseñar interfaces cerebro-computadora (BCI por sus siglas en inglés) con NF, ha sido posible mediante el desarrollo de diademas de uno o varios sensores cerebrales. Una vez que se adquieren los biopotenciales, se complementan con protocolos de comunicación.

En el 2017, Binte Zafar et al., abordaron el tema de BCI utilizando electroencefalogramas (EEG por sus siglas en inglés) asociados a TDAH y terapias de Neurofeedback. Para ello, presentan una revisión de literatura de 23 estudios desde los años 1996 a 2015 donde se observaron diferentes

estrategias de BCI que utilizan el ritmo motosensorial, la relación Theta/Beta y el potencial cortical lento como protocolos de análisis de señales. La conclusión de los autores revela que el NF es una técnica de tratamiento prometedora, de rápido progreso y con resultados sostenibles. Siendo NF un área de investigación emergente, con pocos estudios en el tratamiento del TDAH [6].

En el 2018, Shereena et al., sugieren que el NF es un método eficaz para mejorar los déficits cognitivos y ayuda a reducir los síntomas y el comportamiento del TDAH. En la investigación se encontró que el rendimiento académico mejoró en niños con TDAH. Los síntomas inducidos por NF se mantuvieron a los 6 meses de seguimiento en niños. Los resultados del estudio concluyen que la mejora en el funcionamiento psicológico, conductual y académico proporciona apoyo empírico adicional a la opinión de que el NF puede considerarse como un tratamiento efectivo a largo plazo para los niños con TDAH [7].

En el 2019, Enriquez-Geppert et al., determinan que basados en el metaanálisis y en ensayos controlados aleatorios, sometieron 3 protocolos de entrenamiento de neurofeedback, denominados theta/beta (TBR), ritmo motosensorial (SMR) y potencial cortical lento (SCP), que resultan ser eficaces y específicos. Con ello, concluyen que el NF con protocolos estandarizados en TDAH puede considerarse como tratamiento viable [8].

Por otro lado, respecto a los dispositivos disponibles para medición EEG. TajDini et. al. en 2020, compararon instrumentos portátiles para la recopilación continua de datos EEG en entornos no médicos, con aplicaciones como BCI, educación o monitorización de los ritmos cerebrales. Destaca la simplicidad de los equipos de Neurosky por su arquitectura abierta, bajo costo y su aplicabilidad en el desarrollo de BCI además de una precisión del 80% en la detección de estados de concentración y meditación por su diseño de un único electrodo en el lóbulo frontal [9].

Retomando los trabajos de neurorrehabilitación cognitiva en TDAH. Para el 2021, Rubia et al., proponen el término de Neuroterapia y lo contrasta con EEG-NF, concluyendo que la neuroterapia, en términos de desarrollo, aún está en su infancia en el campo de TDAH. Y que un gran número de metaanálisis de ensayos controlados aleatorios de EEG-NF muestran efectos consistentes de pequeños a medianos para las mejorías de los síntomas, pero aún existe controversia en el tema [10].

En conclusión, en lo que respecta al uso de señales EEG para NF en múltiples aplicaciones para tratamiento de TDAH, aún existe controversia y se solicitan más pruebas estandarizadas, pero de manera general se acepta como una alternativa en el tratamiento multi colaborativo.

Derivado de los resultados publicados y analizados en esta sección, se definió el uso de EEG-NF con un protocolo theta/beta relacionado con el nivel de concentración, medido en la parte frontal del cerebro y un sólo sensor.

3. Metodología y Diseño

3.1 Metodología

La metodología experimental está conformada por cuatro etapas: Selección de prueba por profesional, Ejecución de la prueba y adquisición de registro cerebral, Procesamiento y acondicionamiento del registro cerebral, Control de sistema mecatrónico; que son descritas en la figura 1.

Por otro lado, con el objetivo de describir la estructura hardware y software completa que propone este trabajo, se ilustra la figura 2: Headset Neurosky Mindwave Mobile - NMM, Módulo Bluetooth HC-05 - MB, Arduino Nano - AN y NI LabVIEW + DAQ 6009. La comunicación entre los componentes se estableció con el desarrollo de interfaces y algoritmos en plataformas como el IDE de Arduino, Python y un instrumento virtual programado en NI LabVIEW.

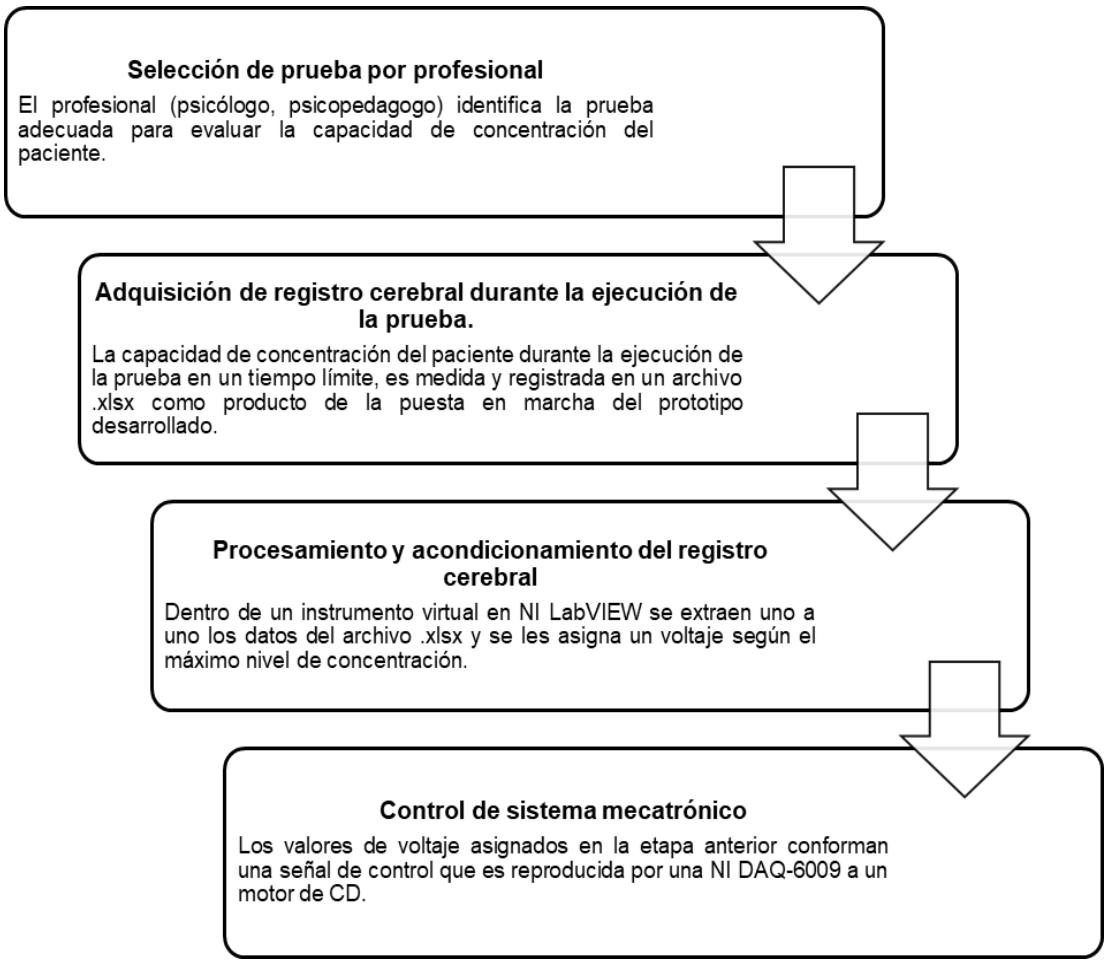


Figura 1. Metodología experimental para terapia cognitiva de EEG-Neurofeedback.

Figura 2. Composición hardware y software del prototipo propuesto para terapia cognitiva de NF.

3.1.1 Selección de prueba

Como parte del procedimiento de diagnóstico del TDAH, es recomendado realizar una prueba de inteligencia pues, aunque el trastorno llega a encontrarse en todo el espectro del coeficiente intelectual, la discapacidad intelectual leve y un IQ bajo son típicamente asociados a esta condición [11].

Las investigaciones sobre la relación entre este tipo de pruebas y el TDAH han demostrado que a través de ellas es posible identificar las dificultades del individuo en el dominio cognitivo. Unal et al., en 2020 señalan en particular el uso de la Escala de Inteligencia de Wechsler para niños (WISC por sus siglas en inglés) como una ponderación ampliamente aplicada en la práctica clínica y la investigación [12].

La cuarta edición de WISC cuenta con una estructura de cuatro cocientes o índices para representar los dominios más estrechos del funcionamiento cognitivo: Comprensión Verbal, Razonamiento Perceptivo, Memoria de Trabajo y Velocidad de Procesamiento de la Información.

Krieger & Amador-Campos (2021) y Park & Choi (2017) determinan el uso del cociente de Velocidad de Procesamiento de la Información (VPI) como prueba estandarizada dentro del espectro de TDAH de la cual se obtiene una métrica de atención, por lo tanto, una mejoría progresiva en el rendimiento de los individuos en esta prueba llegaría a considerarse como una mayor capacidad de atención [13][14].

Para evaluar la Velocidad de Procesamiento de la Información dentro de la prueba experimental de este trabajo se aplica la subprueba Claves. Implica que el individuo relacione en un tiempo límite, símbolos y números previamente asignados que aparecen de forma aleatoria, cuenta con una sección de reactivos muestra en los que el profesional debe asegurarse que el pequeño asimila correctamente las instrucciones, tal como lo muestra la figura 3.

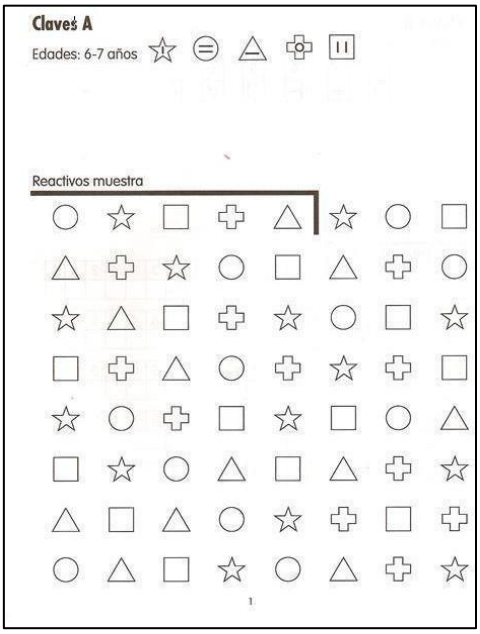


Figura 3. Subprueba Claves de WISC-IV [15].

3.1.2 Adquisición de registro cerebral durante la ejecución de la prueba

El prototipo propuesto para esta etapa tiene como objetivo la adquisición, decodificación y almacenamiento de las señales EEG durante terapias cognitivas aplicadas al tratamiento de TDAH. Con ayuda del NF se propone reflejar la actividad cerebral en una atracción visual o física para el paciente.

La estructura de hardware del prototipo desarrollado consta de cuatro componentes básicos más el sistema mecatrónico que funge como atracción visual o física, en este caso específico, el control de velocidad de un motor de corriente directa.

Cabe mencionar que el resultado final del nivel de concentración que logra el paciente es una señal de voltaje acondicionada que permite el control de cualquier sistema mecatrónico que sirva como motivación intrínseca para el paciente. Para el profesional en salud los beneficios son: la posibilidad de llevar un registro de cada prueba de concentración y evaluar cual sistema mecatrónico genera mejores resultados y concordancia con la personalidad y edad del paciente.

El funcionamiento de esta etapa (figura 4) inicia con la NNM que envía la actividad cerebral en una cadena de bytes que contiene la información de los niveles de calidad de la señal, concentración y meditación. Para la recepción y transmisión de la señal BT hacia un AN se integra un módulo HC-05. Una vez que la actividad cerebral se recibe en el AN, se utiliza la IDE de Arduino para decodificar la señal de concentración. Y a través del monitor serial de la IDE de Arduino se extraen y se almacenan los niveles de concentración en un arreglo desarrollado en Python, para finalmente generar una interfaz gráfica y un archivo con extensión .xlsx.

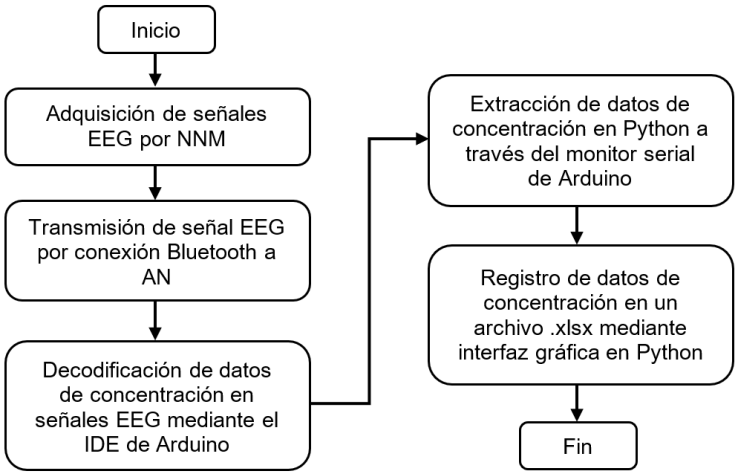


Figura 4. Funcionamiento de etapa de adquisición y registro de datos de concentración.

Hasta este punto, los procesos anteriores se realizan a la par uno del otro, es decir, mientras la NMM envía datos continuamente, el algoritmo de extracción en Python trabaja en conjunto con el código del AN para la decodificación de los datos. Estos subprocesos actúan simultáneamente a la aplicación de la prueba de concentración al paciente, en la figura 5 se observa de forma sintetizada la conjunción de las fases.

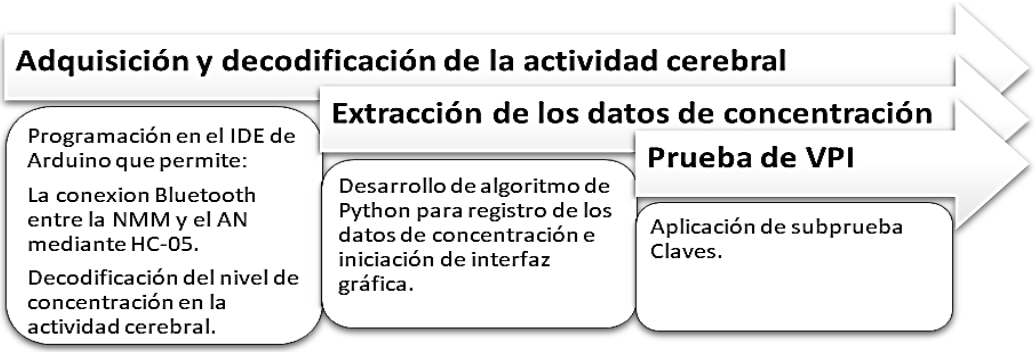


Figura 5. Proceso conjunto de la aplicación de la prueba de concentración y registro de datos de concentración.

3.1.3 Procesamiento y acondicionamiento de registro cerebral

La última etapa de tratamiento de los datos de concentración se realiza con un instrumento virtual de NI LabVIEW que consta de tres fases representadas en la figura 6 y descritas a continuación:

Figura 6. Etapas del procesamiento en NI LabVIEW.

- **Lectura de datos:** Para acceder a los datos previamente escritos en un archivo .xlsx por la interfaz en Python nos apoyamos del Report Generation Toolkit que es un add-on de software que proporciona funciones para generar, crear y editar reportes de Microsoft.

- **Asignación de voltaje:** Una vez leídos todos los datos, el VI identifica el mayor nivel de concentración y le asigna un valor de 2.5 volts, tomándolo como referencia para determinar un voltaje a cada valor conforme se extraen uno por uno mediante un arreglo que involucra una estructura de eventos y ciclos for en función del corrimiento del tiempo.

- **Reproducción de señal de control:** Como terapia cognitiva de NF, la señal de control se retroalimenta al paciente por medio de una DAQ-6009, por lo que una vez que cada nivel de concentración tiene asignado un voltaje, estos son reproducidos a través de una de las salidas analógicas.

4. Resultados

Como primer producto del prototipo presentado en este artículo, se diseñó una interfaz gráfica (figura 7) en la que el profesional se apoya para llevar a cabo la adquisición de los datos de concentración durante las terapias. Su uso es simple pues su diseño únicamente consta de dos secciones. En la parte central hay un cuadro de texto en el que se introduce el tiempo límite que tomará aplicar la prueba. En la parte inferior cuenta con tres botones: iniciar rutina, reiniciar rutina y cerrar programa.

La etapa de extracción de datos diseñada en Python genera una tabla en archivo .xlsx con la información del tiempo y concentración del individuo que realiza la prueba en un formato de dos columnas, la figura 8 es la representación gráfica de los datos recabados durante la aplicación de la prueba estandarizada Claves. La gráfica denota los picos de focalización en color verde y desatención en color rojo durante el desarrollo de la prueba, estos indican la variación de la capacidad de concentración del usuario . De acuerdo a Krieger et al., los síntomas de desatención en el TDAH están asociados con déficits en la región frontoparietal, lo que probablemente explicaría la variedad de la presentación de los síntomas y los deterioros cognitivos asociados como problemas de velocidad de procesamiento [14].

Figura 7. Interfaz gráfica en Python para profesionales en salud.

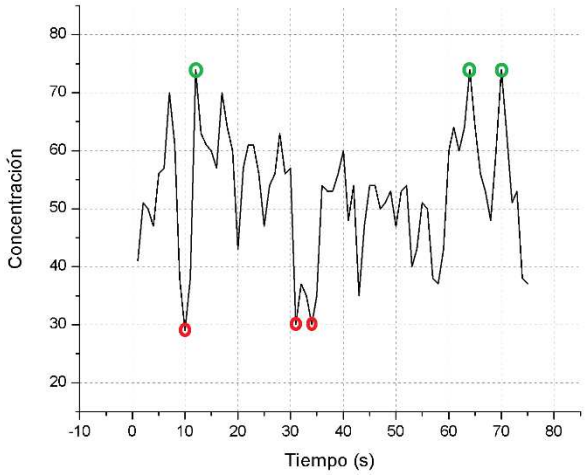


Figura 8. Ritmos EEG de concentración durante prueba experimental.

Los datos registrados en el archivo .xlsx son introducidos en un instrumento virtual en NI LabVIEW correspondiente a la sección 3.1.3 donde son procesados. La figura 9 es la representación de esta interfaz, en ella se observan tres secciones, una de ellas en la parte superior, donde se importa el archivo .xlsx de interés, mientras que en la parte inferior izquierda hay indicadores que muestran uno a uno los valores de concentración y voltaje asignados, además del máximo nivel de concentración. En la parte derecha hay dos gráficas que muestran la evolución de los niveles de concentración (gráfica superior) y los valores de voltaje asignados (gráfica inferior) en relación al tiempo.

El producto de la interfaz de la figura 9, es una señal de control. Esta parte del procesamiento corresponde a la etapa de “Control del sistema mecatrónico” de la figura 1, siendo la última fase de la metodología experimental del presente trabajo. Esta señal, la cual se ilustra en la figura 10, está conformada por los valores de concentración del apartado “Datos de prueba cognitiva” en la figura 9 que fueron procesados según la etapa de “Asignación de voltaje” de la figura 6.

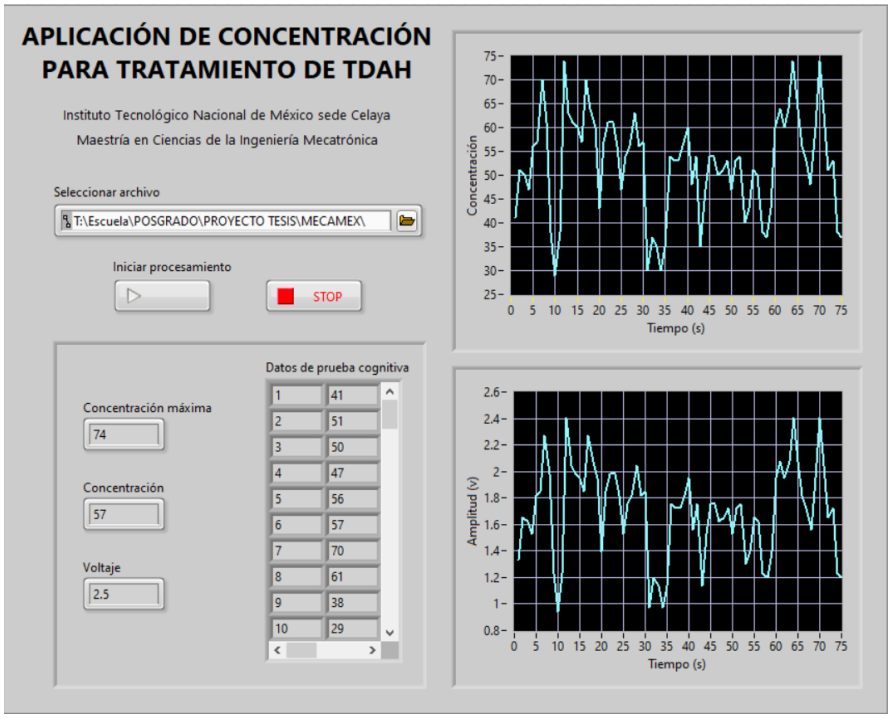


Figura 9. Acondicionamiento y reproducción de señal de control en NI LabVIEW.

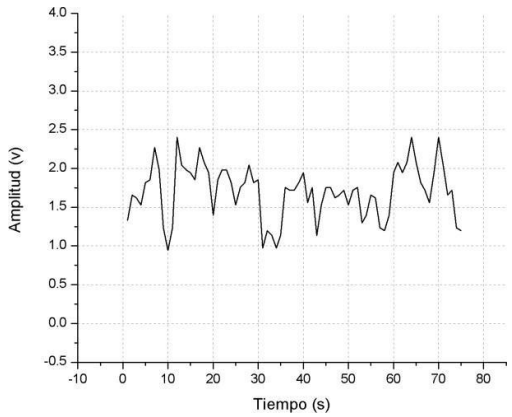


Figura 10. Valores de voltaje de acuerdo con los niveles de concentración acondicionados.

El sistema mecatrónico propuesto se orienta al control de velocidad de un motor de corriente directa Leeson de 90 Volts, su comportamiento en función de los niveles de concentración se ilustra en la figura 11. La selección del sistema se justifica con la cantidad de aplicaciones de movimiento que se basan en el control de velocidad, ya sea un vehículo eléctrico, un ventilador o el giro de una rueda, etc. Recordando que el movimiento forma parte de la atracción visual que fomenta la motivación intrínseca del paciente y cierra el ciclo de NF en terapia de rehabilitación cognitiva.

Para lograr el control de velocidad se propone una etapa de potencia dependiente de la señal de control obtenida por la actividad cerebral registrada durante la prueba de concentración. La etapa de potencia está diseñada a partir de un puente H con un puente trifásico de IGBTs modelo 6MBP 30RH-06, donde solo se utilizan dos ramas. Para la etapa de aislamiento se utilizan optoacopladores TLP250 y alimentaciones aisladas por medio de convertidores CD-CD de la marca Murata mev1s0515sc.

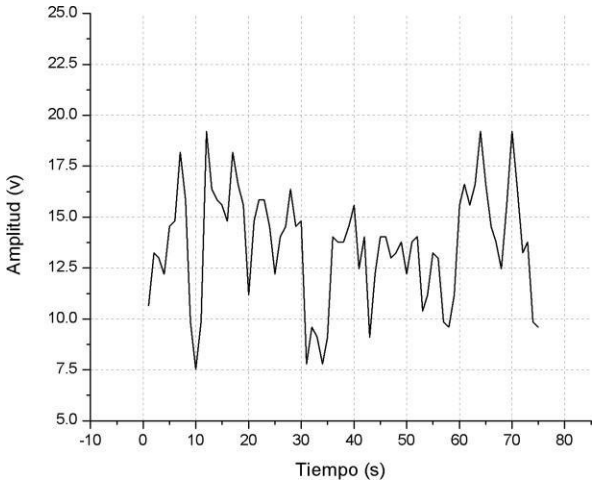


Figura 11. Variación de la velocidad de un motor CD en función de señales EEG de concentración.

En la parte del control de los IGBTs, se propone un control tipo PWM dependiente de la señal de control, a través de un microcontrolador integrado en una tarjeta de desarrollo Raspberry Pico y una pantalla de OLED. La figura 12 muestra los diagramas de conexión de los elementos básicos del puente H, así como la PCB prototipo.

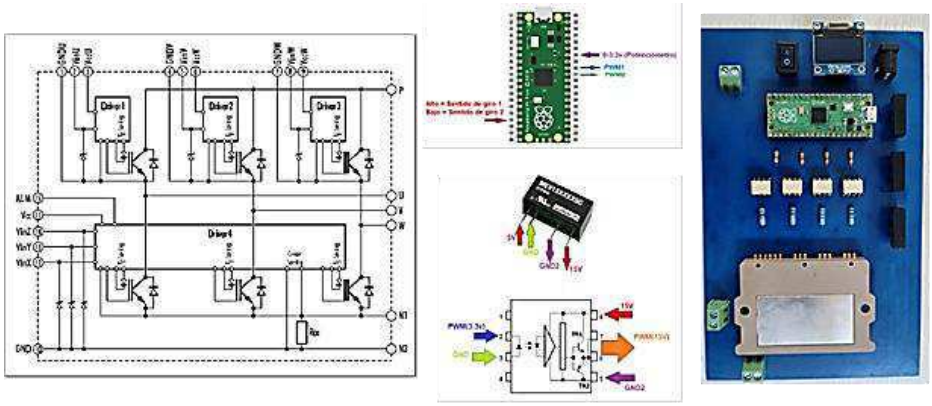


Figura 12. Diagramas de conexión de los elementos básicos de un puente H de IGBTs y PCB prototipo.

Además de la modulación de la velocidad de un motor, la señal de voltaje puede aplicarse para el control de algunos otros dispositivos electrónicos y/o actuadores, como luces LED o servomotores en los que el profesional intérprete para el paciente de manera física y tangible su rendimiento con el fin de asimilarlo como motivación para mantenerse en un estado de concentración.

En 2013, Rodríguez et. al. desarrollaron un sistema de NF basado en un esquema de juego BCI para controlar la altura de una bola dentro de un tubo de vidrio en función del nivel de concentración de un usuario [16]. Más adelante, en 2022, Nermend et. al. recurrieron a protocolos de entrenamiento de NF como SMR y TBR en juegos de simulación como *"The Snowman"*, donde las variaciones del ritmo Theta modulan la velocidad de un muñeco de nieve bueno con el objetivo de huir de otros muñecos de nieve malvados [17]. Sin embargo, a diferencia de estas innovaciones, esta investigación presenta una metodología capaz de brindar beneficios diferentes al profesional de salud. Estos beneficios son: el registro por prueba de concentración, la posibilidad de valorar si el resultado de la actividad cerebral no se debe a alguna interferencia externa (calidad de la señal del sensor del Headset NMM), desventaja de los procesos de retroalimentación en tiempo real dentro de terapias cognitivas y finalmente, la posibilidad de cambiar el sistema mecatrónico de acuerdo con el tratamiento del TDAH.

5. Conclusiones

El sistema mecatrónico propuesto es una vertiente a otras aplicaciones auxiliares en pro de la salud en ámbitos de terapia de rehabilitación cognitiva, pues se demuestra que con la integración de dispositivos open-source y aplicaciones de software es posible presentar una metodología innovadora para el tratamiento de TDAH en niños. Se busca como trabajo futuro que la garantía de su aplicación en pacientes diagnosticados con TDAH sea analizada y validada por expertos en el tema de la salud mediante el registro y evaluación de datos de concentración en terapias de rehabilitación cognitiva.

Contemplando también como trabajo a largo plazo se retroalimentará con psiquiatras, neurólogos, psicólogos, terapeutas ocupacionales o pedagogos con el objetivo de identificar áreas de oportunidad en el prototipo como la propuesta de diferentes sistemas mecatrónicos dinámicos en los que al reproducir la señal de control, el estímulo físico o visual sea acorde a la personalidad del paciente pues como se menciona anteriormente la adquisición de ritmos EEG y su uso como NF para determinar el neuro-control de actuadores que inspire el interés a concentrarse en los pacientes, representa una amplia variedad de aplicaciones dinámicas en las que se podría emplear.

Referencias

[1] Organización Panamericana de la Salud. *"Clasificación Estadística Internacional de Enfermedades y Problemas Relacionados con la Salud. Décima revisión."*, Organización Mundial de la Salud, EE.UU., (2015).
[2] Morrison, M. *"DSM - 5. Guía para el diagnóstico clínico.",* Editorial el Manual Moderno. México, (2015).
[3] Polanczyk, G., De Lima, M., Horta, B., et. al. *"The Worldwide Prevalence of ADHD: A Systematic Review and Metaregression Analysis."*, American Journal of Psychiatry, 164(6), 942-948, (2007).
[4] Secretaria de Salud. *"Cinco por ciento de la población infantil y adolescente presenta TDA."*, Gobierno de México, (2017).
[5] Palacios - Cruz, L., De la Peña, F., Valderrama, A., et. al. *"Conocimientos, creencias y actitudes en padres mexicanos acerca del trastorno por déficit de atención con hiperactividad (TDAH)."*, Salud Mental, Vol. 34(2), 149 - 145, (2011).
[6] Zafar, M., Shah, K. & Malik, H. *"Prospects of Sustainable ADHD Treatment Trough Brain-Computer Interface Systems."*, International Conference on Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT), Pakistan, (2017).
[7] Sheerena, E., Gupta, R., Bennett, C., et. al. *"EEG Neurofeedback Training in Children With Attention Deficit/Hyperactivity Disorder: A Cognitive and Behavioral Outcome Study."*, EEG and Clinical Neuroscience Society (ECNS), Vol. 50(4), 242 - 255, (2018).
[8] Enriquez-Geppert, S., Smit. D., Pimenta, D., et. al. *"Neurofeedback as a Treatment Intervention in ADHD: Current Evidence and Practice."*, Current Psychiatry Reports 21(46), (2019).
[9] TajDini, M., Sokolov, V., Kuzminykh, I., et. al. *"Wireless Sensors for Brain Activity – A Survey."*, Electronics, 9(12), 2092, (2020).
[10] Rubia, K., Westwood, S., Aggensteiner, P., et. al. *"Neurotherapeutics for Attention Deficit/Hyperactivity Disorder (ADHD): Review."*, Cells, 10(8), 2156, (2021).
[11] Dreschler, R., Brem, S., Brandeis, D., et. al. *"ADHD: Current Concepts and Treatments in Children and Adolescents."*, Neuropediatrics, 51:315-335, (2020).
[12] Unal, D., Cicek, N., Cak, T., et. al. *"Comparative Analysis of the WISC-IV in a clinical setting: ADHD vs. non-ADHD."*, French Society of Pediatrics, Vol. 28(1), 16-22, (2020).
[13] Park, Y & Choi, Y., *"Effects of interactive metronome training on timing, attention, working memory and processing speed in children with ADHD: a case study of two children"*, Journal of Physical Therapy Science, 29(12), 2165-2167, (2017).
[14] Krieger, V & Amador-Campos, J., *"Clinical presentations of attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD) in children and adolescents: comparison of neurocognitive performance"*, Child Neuropsychology, 27(8), 1024-1053, (2021).
[15] Wechsler, D. *"Escala Wechsler de inteligencia para niños - IV"*, Manual Moderno, 4ed, (2007).

[16] Rodríguez, M., Giménez, R., Diez, P. et al., *"Playing with your mind"*, Journal of Physics, 477, 012038, (2013).
[17] Nermend, M., Flaga-Gieruszynska, K., Kroplewski, Z., et. al., *"Neurological Mechanisms of Diagnosis and Therapy in School Children with ADHD in Poland"*, International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(13), 7615, (2022).

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 7, pp. 86 – 94
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Sistema mecatrónico para el proceso de inoculación automatizado en medios de cultivo

Peñaloza Mendoza Guillermo Rey[1], Flores Medina Pablo Jonatán, Garibay Murillo Paola

Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro, División de Ingeniería Biomédica TecNM
[1]grey@itspa.edu.mx

Resumen

Los laboratorios clínicos pertenecientes al sistema de salud en México son de los departamentos más discriminados debido a factores como fuentes de financiamiento ya que necesita de una fuerte gestión administrativa, así como la dependencia de vasta infraestructura, recurso material y humano. Desarrollando un dispositivo que realice el proceso de cultivos microbiológicos de forma automática, sin la necesidad de una extensa infraestructura y el recurso humano habitual, se les permitirá acceder con mayor facilidad a las comunidades rurales y suburbanas que carecen principalmente de estos servicios. Para ello se estandarizó el tipo de estriado para el cultivo, se cultivaron bacterias gram+ y gram- en agar sangre y agar MacConkey para encontrar y comparar las variables de cultivo, así como modelos 3D y físicos del prototipo.

Palabras clave: Cultivo microbiológico, Estriado del cultivo, Bacterias gram+ y gram-, Automatización.

1. Introducción

Las enfermedades respiratorias son causa primordial de muerte en México, siendo las más comunes la enfermedad pulmonar obstructiva crónica, la neumonía-influenza, los tumores malignos del tórax, las muertes respiratorias neonatales, los trastornos de la circulación pulmonar, las enfermedades intersticiales, el asma y la tuberculosis, de acuerdo con la Tabla 1. Según el Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias Ismael Cosío Villegas se contabilizaron 79,383 muertes respiratorias en 2015, de las cuales, 54,173 estaban en los códigos «J».

Tabla 1. Muertes respiratorias dentro y fuera de los códigos «J» de la CIE-10 (México 2015, fuente: Organización Mundial de la Salud).

Muertes por trastorno respiratorio	Código	Total
EPOC, enfisema, BC	J41-44	23,851
Influenza y neumonía	J10-18	18,458
Tumores malignos de tórax	C30-40	7,825
Hipoxia neonatal, aspiración, neumonía neonatal	P20-P28	6,817
Ahogamiento, aspiración, cuerpos extraños	W65-W84	4,949
Enfermedad pulmonar intersticial*	J45-46	3,181
Otras enfermedades respiratorias	J98	2,768
Cor pulmonale, tromboembolia, HAP	I26-I28	2,108

Tabla 1 (cont.). Muertes respiratorias dentro y fuera de los códigos «J» de la CIE-10 (México 2015, fuente: Organización Mundial de la Salud).

Muertes por trastorno respiratorio	Código	Total
Tb respiratoria y miliar y complicaciones	A15, A16, A19, B90.9	1,983
Asma	J45-46	1,296
IRA baja no especificada	J22	743
VIH y *P. jirovecci* o con neumonía	B20-B20.6	697
Edema pulmonar	J81	657
Daño pulmonar por agentes externos	J68-70	645
Falla respiratoria	J96	550
Derrame, neumotórax y otras enfermedades pleurales	J90-94	524
Supuración pulmonar o pleural	J85-86	394
Bronquitis aguda	J20	376
Malformaciones congénitas respiratorias	Q30-Q34	294
Bronquitis no especificada	J40	208
SIRA	J80	164
Fibrosis quística pulmonar	E84.0	144
IRA superior	J0-J6	136
Enfermedades de la nariz, senos paranasales, garganta, laringe	J30-39	135
Bronquiolitis aguda	J21	87
Embolismo obstétrico	O88	72
Síndrome pickwickiano, síndrome de obesidad con hipoventilación	E66.2	62
Tumores torácicos mal especificados	C76.1	54
Apnea del sueño	G47.3	43
Problemas de oídos y mastoides	H60-H95	38
Tosferina	A37	36
Tumores benignos de tórax	D14,15,19	26
Aspergilosis pulmonar	B44	15
Deformidades del tórax congénitas y adquiridas	M40-M43	14
Coccidioidomicosis pulmonar	B38.0-B38.2	8
Candidiasis pulmonar	B37.1	8
Histoplasmosis pulmonar	B39.0-39.2	5
Neumocistosis	B59	4

En México hay alrededor de 12 mil laboratorios de análisis clínico de los cuales cerca de 9 mil son de carácter privado según statista (2017), su distribución es en zonas urbanas no permitiendo el fácil acceso o nulo de las comunidades rurales y suburbanas, agregando el índice de pobreza que existe en México especialmente en las zonas rurales con un 41.9% a 43.9% de la población total según INEGI(2020) imposibilitan el acceso preanalítico y analítico del proceso de los servicios de los análisis clínicos de diagnóstico.

Según BEATRICE HERVÉ E. (2015) la microbiología ha sido tradicionalmente una disciplina manual que a diferencia de otras áreas del laboratorio, la automatización de ésta no ha sido fácil, principalmente debido a la gran variabilidad en el tipo de muestras, diversidad y número de microorganismos a identificar y un volumen relativamente menor de exámenes, esto nos provoca la necesidad de tener personal especialista de QFB o técnicos en laboratorios clínicos con una infraestructura y normativa adecuada.

Los análisis clínicos pueden ayudar a identificar una gran variedad de enfermedades en etapas subclínicas. Generalmente los análisis clínicos se realizan por solicitud de los médicos en caso de que se sospeche de algún padecimiento. Sin embargo, es recomendable realizarse análisis clínicos de rutina al menos 1 o 2 veces al año para detectar las posibles anomalías que son señal de una posible enfermedad o padecimiento.

Esta práctica se realiza en condiciones óptimas donde existen laboratorios clínicos al alcance de todos, sin embargo, en zonas rurales no se cuentan con las condiciones óptimas de infraestructura y personal para llevar a cabo la labor de análisis clínicos, por lo que en muchos y en el mejor de los casos las personas pueden trasladarse a una zona geográfica donde existe acceso a los análisis antes mencionados, generando gastos extras y dificultades en la mayoría de las comunidades rurales

2. Método y tarea a realizar

Puntos importantes para realizar el proceso de inoculación son los problemas de calidad y estandarización de la estría o inóculo, contaminación cruzada, tiempo de procesamiento y costos. Algunos puntos tomados en la NOM-007-SSA3-2011, para la organización y funcionamiento de los laboratorios clínicos.

Se realizó una investigación con una metodología mixta y de un alcance experimental, puesto que comienza con seleccionar cuáles o cuál son la familia de microorganismos de mayor interés clínico en las zonas rurales de Michoacán y México. En el estado de Michoacán, según Statista (2021), los microorganismos que causan las tasas más altas de mortalidad son aquellas que generan infecciones respiratorias, de interés microbiológico, aquellos que generan la neumonía bacteriana, en la figura 1 se puede apreciar una gráfica de las principales causas de muerte en Michoacán.

Se determinaron los métodos de estriado dependiendo el estudio solicitado y la forma de crecimiento del microorganismo, esto, para aislar las colonias microbianas. Las estrías en una placa de agar se diluyen de manera que una sola célula bacteriana se deposita en una zona específica de la placa de agar. Varias de esas células individuales están separadas unos pocos milímetros de distancia en la placa. Cada una de estas células individuales se divide para formar miles de nuevas células, dando lugar a colonias aisladas que permiten un mejor análisis. Los métodos utilizados son el estriado en T, estriado por cuadrantes y el estriado masivo, las diferencias entre estos se pueden observar en la figura 2.

Se determinaron las condiciones que debe tener el proceso para realizarse una buena inoculación en los medios de cultivo, en primera instancia, consideramos las bacterias que nos es de mayor interés cultivar, al ser aquellas que generan la neumonía debemos seleccionar medios de cultivo selectivos, estos son los caldos o agares que estimulan el crecimiento de una o unas especies de bacterias concretas e inhiben el de las otras.

Al tratarse en su mayoría de bacterias gram+ y gram- priorizamos los agares MacConkey, esté inhibe el crecimiento de las bacterias gran+ y estimula la reproducción de los bacilos gram-, los cuales, además de ayudar a proliferar bacterias causantes de la neumonía suelen estar detrás de infecciones urinarias, diarreas, enfermedades gastrointestinales, bacteriemias (bacterias en la sangre), peritonitis e incluso el tifus, el cólera o la peste. El segundo medio de prioridad es el agar sangre, mostrado en la figura 3, este es utilizado para estudiar la función hemolítica de distintos patógenos, es decir, su capacidad para destruir los eritrocitos (glóbulos rojos) cuando circulan por el torrente sanguíneo, es ideal para detectar la presencia del Streptococcus pneumoniae, dicho microorganismo es el que causa con mayor frecuencia la neumonía.

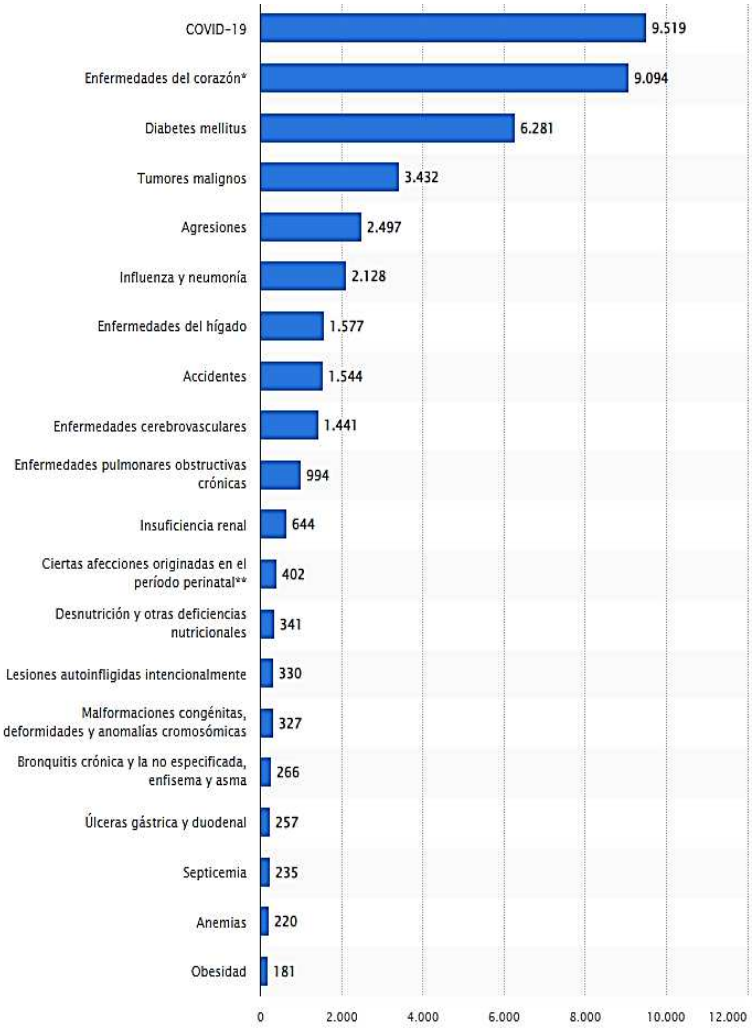


Figura 1. Principales causas de muerte en el estado de Michoacán (Michoacán 2021, fuente: Statista).

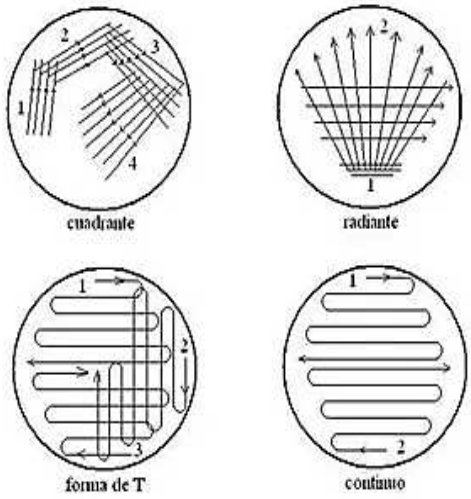


Figura 2. Métodos de estriado (Tomado del blog: https://chemicwarrior.blogspot.com/2016/09/).

Figura 3. Agar sangre (Tomado de: https://mdmcientifica.com/producto/agar-sangre/).

Considerando las variables de los métodos y técnicas de inoculación, se realizó un modelo 3D de los departamentos esenciales para poder realizar el proceso. Se definieron 4, todos con un método de descontaminación y esterilización generalizada para evitar crecimiento microbiológico en zonas no deseadas, así como los materiales adecuados que cumplan con la normatividad y estándares de calidad. En el diagrama de bloques de la figura 4, se puede observar que cada etapa depende de la otra, por lo tanto, el proceso de desinfección es esencial para evitar un mal cultivo.

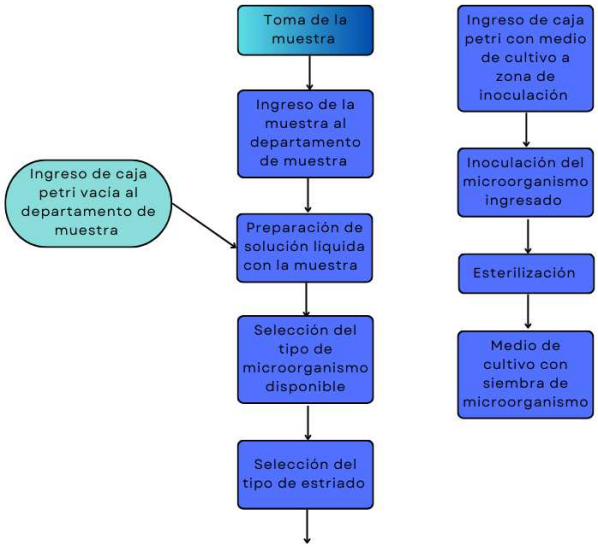


Figura 4. Proceso del dispositivo mecatrónico para la inoculación.

El primer departamento es el que contendrá los dispositivos con el método de estriado, este lo seleccionará el usuario desde el panel de control dependiendo el tipo de estudio solicitado.

El segundo departamento contiene la solución liquida de la muestra obtenida por el usuario, este apartado debe contar además de un buen aislamiento para evitar contaminaciones, las variables controladas para la conservación de la muestra, así como un depósito donde se colocará la muestra desde fuera del dispositivo para poder ser manipulada.

En el tercer departamento será el que realice el proceso del cultivo, en ella se encontrará el medio de cultivo que será ingresado por el usuario y posicionado en una zona específica, posteriormente, el actuador con el dispositivo que realiza el estriado impregnará el agar con la solución que contiene la muestra, mediante la siembra debe tener un control adecuado de temperatura para evitar contaminación cruzada, al ser el departamento que tiene el mayor riesgo de contaminación, se implementarán medidas más estrictas de descontaminación con temperatura y frecuencias de onda que inhabiliten a los microorganismos.

El cuarto departamento será el encargado de realizar la esterilización de los actuadores que tiene mayor riesgo de contaminación, así como del dispositivo de inoculación, se eliminarán los restos de muestra y se desecharán según la norma NOM-087-ECOL-SSA1-2002 sobre el manejo de residuos biológico infecciosos.

Para realizar la descontaminación se usará además de temperatura controlada, frecuencias de onda que permiten inhibir el crecimiento microbiológico, estas tienen un ancho de banda entre los 250nm a los 260nm, perteneciendo a la luz UV. Esta técnica de descontaminación, según la literatura tiene una efectividad de hasta el 99% en medios sólidos con la ventaja de no afectar los dispositivos electrónicos por condiciones ambientales como lo puede ser la temperatura o humedad.

Se realizó un modelo escala, en el que se prototipa el recorrido que tendrán los actuadores sobre los departamentos y parte de su funcionamiento con sus tareas, él se emplean rodamientos, soportes, ejes, y actuadores, como actuadores utilizamos motores a pasos NEMA 17, mostrado en la figura 5, este motor es de tipo bipolar, con un ángulo de paso de 1, 8º, por lo que cada vuelta se divide en 200 pasos.

Además, cada bobinado de los que tiene en su interior soporta 1.2A de intensidad a 4v de tensión, con lo que es capaz de desarrollar una fuerza considerable de 3.2 kg/cm. Para controlarlo se utilizó el driver TB6600 que permite controlar motores de hasta 3.5A por canal (figura 6).

Este driver tiene limitación de corriente ajustable, protección contra sobre corriente y 7 resoluciones diferentes de microstepping, es un controlador profesional para motores paso a paso bipolares y tiene la ventaja de ser compatible con microcontroladores como Arduino y otros que puedan generar señales de pulsos de 5V. Se utilizó un servomotor A949, este último se planea cambiar por un actuador lineal tipo solenoide.

Figura 5. NEMA 17 (Tomado de: https://alexnld.com/product/nema-17-stepper-motor-42mm-1-68a-for-cnc-router/).

Figura 6. Driver TB6600 (Tomado de: https://www.voltaat.com/products/4a-9-42v-stepper-motor-driver-tb6600).

3. Resultados

Se analizaron diversos microorganismos en el estado de Michoacán con la intención de centrarnos en el que tiene mayor interés clínico. Según statista(2021), los microorganismos que causan más muertes en Michoacán son aquellas que originan neumonía, contabilizando 2128 muertes anuales, por lo tanto, las pruebas de inoculación para estos microorganismos son el centro de atención.

En las figuras 7 y 8 se muestran cultivos de bacterias gram- en Agar MacConkey por método de cuadrantes y cultivos de Lactosa + en Agar MacConkey por método de cuadrantes. Estas pruebas de inoculación en diferentes medios de cultivo se realizan con la finalidad de comparar los barridos manuales con la técnica que se aplica con el dispositivo, según el microorganismo sembrado, se obtienen diferentes características que son importantes para comenzar a estandarizar el estriado y qué características puede otorgar para su posterior análisis. Cabe mencionar que aunque existen estándares para el empleo de los estriados, cada uno de ellos solo puede ser aplicado para pocos casos, por lo tanto, es necesario validar esto en el prototipo.

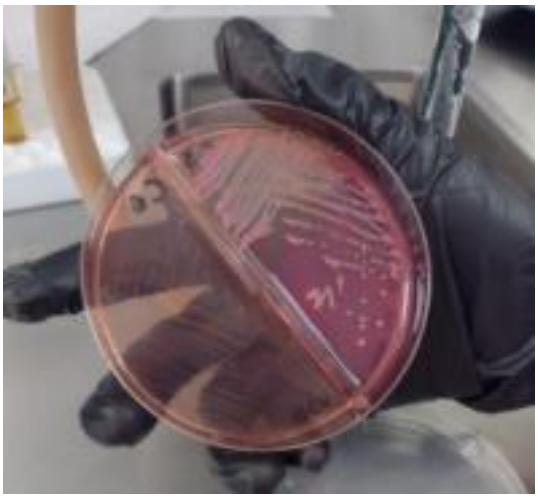


Figura 7. Cultivo de bacterias gram- en Agar MacConkey por método de cuadrantes.

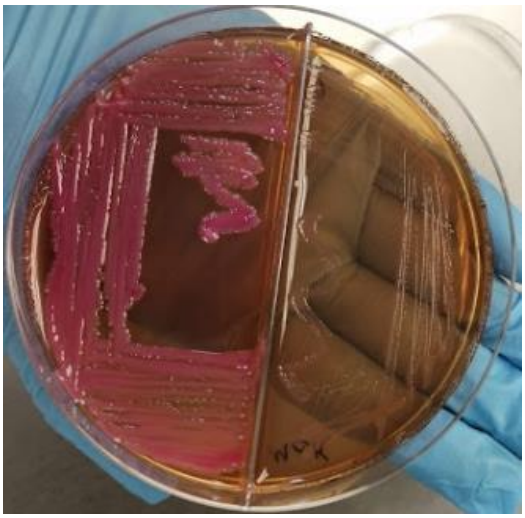


Figura 8. Cultivo de Lactosa + en Agar MacConkey por método de cuadrantes.

En las figura 9 y 10 se presenta el modelo 3D de la estructura del prototipo mecatrónico para la automatización de la inoculación en el medio de cultivo, se encuentra desarrollado en el software fusion 360.

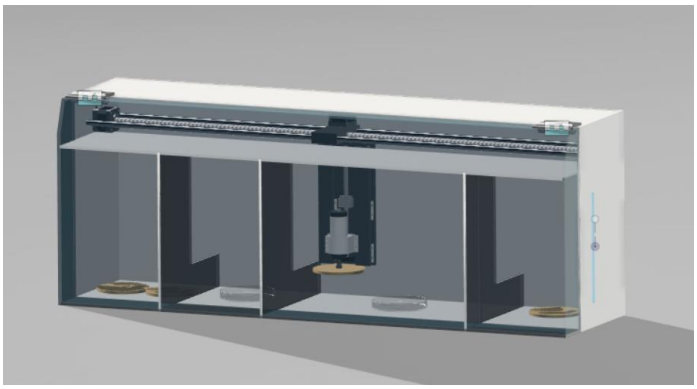


Figura 9. Modelo del dispositivo en Fusion 360.

De manera física, el modelo del prototipo se muestra en la figura 11, esta estructura representa el posible comportamiento que podría tener el dispositivo, sin embargo, aún existen elementos que se están mejorando para evitar una contaminación de las muestras.

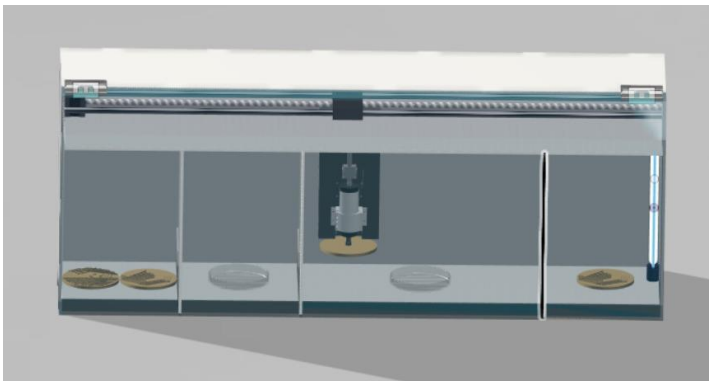


Figura 10. Modelo del dispositivo en Fusion 360 vista frontal.

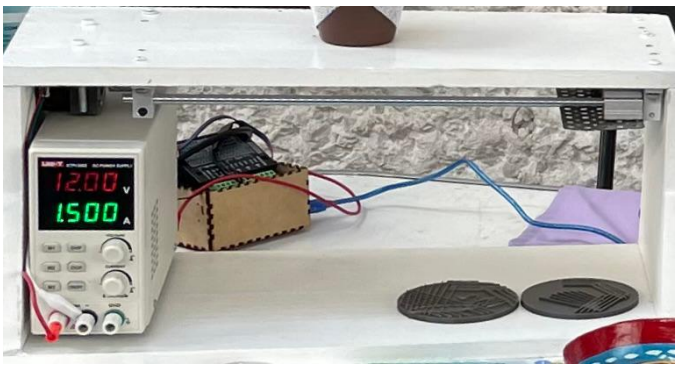


Figura 11. Modelo del prototipo físico

4. Conclusiones

Analizando los cultivos realizados, se identificó que los agares que favorecen a los microorganismos que nos interesa cultivar (bacterias gran+ y gram-) son MacConkey y agar sangre, la literatura menciona que estos dos medios de cultivo son los que más favorecen el crecimiento de microorganismos en muestras con sospechas de neumonía.

Para la parte de descontaminación se están haciendo pruebas con luz UV, según literatura, permite descontaminar un gran espectro de bacterias gram+ y gram-.

Automatizar el laboratorio de microbiología no ha sido una tarea fácil, a pesar de los esfuerzos realizados aún se tienen muchas variables que dificultan la tarea, entre ellas están el terminar de estandarizar la estría, encontrar un método lo más efectivo posible de descontaminación para el recorrido del mecanismo, así como para el dispositivo

Referencias

[1] Bourbeau, P. P., & Ledeboer, N. A. (2013). *Automation in Clinical Microbiology*. Journal of Clinical Microbiology, 51(6), 1658-1665. https://doi.org/10.1128/jcm.00301-13
[2] Duggal, S., Gaind, R., Tandon, N., Deb, M., & Chugh, T. D. (2012). Comparison of an Automated System with Conventional Identification and Antimicrobial Susceptibility Testing. ISRN Microbiology, 2012, 1-4. https://doi.org/10.5402/2012/107203
[3] Dekker, J. P., & Branda, J. A. (2011). MALDI-TOF Mass Spectrometry in the Clinical Microbiology Laboratory. Clinical Microbiology Newsletter, 33(12), 87-93. https://doi.org/10.1016/j.clinmicnews.2011.05.003
[4] E., B. H. (2015). Nuevas tecnologías en diagnóstico microbiológico: automatización y algunas aplicaciones en identificación microbiana y estudio de susceptibilidad. Revista Médica Clínica Las Condes, 26(6), 753-763. https://doi.org/10.1016/j.rmclc.2015.11.004
[5] Gómez, G. y Batista, C. (2006). Optimización de medios de cultivos para microorganismos, una valiosa estrategia para la producción de biopreparados de interés agrícola. Cultivos Tropicales, 27 (3), 17-24.
[6] Mischnik, A., Trampe, M., & Zimmermann, S. (2015). Evaluation of the Impact of Automated Specimen Inoculation, Using Previ Isola, on the Quality of and Technical Time for Stool Cultures. Annals of Laboratory Medicine, 35(1), 82-88. https://doi.org/10.3343/alm.2015.35.1.82
[7] Pérez-Padilla, J. R. (2018). Muertes respiratorias en México, 2015. NCT neumología y cirugía de tórax, 77(3), 198-202. https://www.medigraphic.com/pdfs/neumo/nt-2018/nt183e.pdf
[8] Tapia P., C., Vega S., T. C., & Rojas C. Implementación del laboratorio clínico moderno. Revista Médica Clínica Las Condes, 26(6), 794-801. (2015) https://doi.org/10.1016/j.rmclc.2015.11.008

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 8, pp. 95 - 108.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Plataforma didáctica reconfigurable con Rapsberry Pi 3b+

Maganda Carvajal Jaime Alberto[1], Pérez Orozco Juan Adrián[1], Beltrán Medina Paulina Karely[2], Reyes de la torre Angel[1], Saguilan Guerra José Manuel, Horta Martínez Daniel Emiliano[1], Ramírez Rangel Noel Servando[1], Rico Bravo Juan Carlos[1]

[1]Tecnológico Nacional de México, Campus Querétaro.
[2]Universidad Tecnológica de Querétaro.
jaime.mc@queretaro.tecnm.mx

Resumen

El objetivo de este proyecto fue que los estudiantes de la materia de instrumentación y robótica de la carrera de mecatrónica del Tecnológico Nacional Campus Queretaro manipularan una Raspberry Pi 3B+ con la cual pudieran realizar varias prácticas de sensores, actuadores y conectar los diferentes modelos de Arduino que tuvieran disponibles y así como aprender a instalar y manipular sistemas operativos distintos a los tradicionales en este caso se realizaron pruebas con Linux y Raspbian, para obtener datos y comprender que hay sistemas embebidos económicos a su disposición y finalmente aplicar los conocimientos de programación e integración aprendidos en semestres anteriores y cambiar el paradigma que solo es posible programar, trabajar y obtener datos en los sistemas operativos que se usan desde una laptop o una pc de escritorio, sino que hay otras computadoras de bajo costo y tamaño compacto con las que se pueden realizar las tareas de obtención de datos y programación mencionadas con anterioridad, el problema principal a resolver fue que los estudiantes se familiarizaran con el uso de tarjetas de bajo costo y la integración de sensores y actuadores compatibles con la plataforma Arduino, asi como con el manejo y la instalación de varios sistemas operativos similares a Windows o Mac, con esto finalmente lograr interconectar una Raspberry con las tarjetas de Arduino y adquirir datos para poder agruparlos y manejarlos estadísticamente hablando.

Palabras clave: Plataforma reconfigurable, Raspberry Pi 3B+, Ubuntu Mate, Raspbian.

1. Introducción

La Raspberry Pi es una computadora de bajo costo y con un tamaño compacto, del porte de una tarjeta de crédito, puede ser conectada a un monitor de computador o un TV, y usarse con un mouse y teclado estándar. Es un pequeño computador que corre un sistema operativo linux capaz de permitirle a las personas de todas las edades explorar la computación y aprender a programar lenguajes como Scratch y Python [1].

Es capaz de hacer la mayoría de las tareas típicas de un computador de escritorio, desde navegar en internet, reproducir videos en alta resolución, manipular documentos de ofimática, hasta reproducir juegos. Además, la Raspberry Pi tiene la habilidad de interactuar con el mundo exterior, puede ser usada en una amplia variedad de proyectos digitales, desde reproductores de música y video, detectores de padres, estaciones meteorológicas hasta cajas de aves con cámaras infrarrojas. Queremos que veas que la Raspberry Pi puede ser usada por niños y adultos por todas partes del mundo, para aprender a programar y entender cómo funcionan las computadoras, por ejemplo, los robots pueden trabajar las 24 horas del día sin descanso, lo que permite una mayor producción en menor tiempo [1].

Es un ordenador de bajo costo y de tamaño compacto destinado al desarrollado para hacer accesible la informática a todos los usuarios. La Raspberry Pi también se caracteriza por ser muy utilizada para desarrollar pequeños prototipos y para la formación sobre informática y electrónica en los colegios. Puede ser conectada a un monitor de computador o un TV, y usarse con un mouse y teclado estándar. Raspberry Pi se fabricó con características que fueran útiles para todos y se eliminaron todas aquellas que fueran específicas para un grupo de personas. Se centraron en proporcionar las funciones principales que sabían que todo el mundo iba a necesitar: USB, ratón y teclado, salida de pantalla, ranura para tarjeta de memoria, procesador y multimedia. El hecho que la Raspberry Pi no incorpora una cámara, ni una pantalla integrada, ni más redes, ni un disco duro integrado ha hecho que sea muy económica desde el principio. La Raspberry Pi ha viajado a la ISS (Estación Espacial Internacional) donde realiza experimentos de alumnos de institutos de todo el mundo gracias a la iniciativa Astro Pi. Ha aparecido en programas de televisión como Mr Robot y en películas como Big Hero 6. Se utiliza en multitud de sectores profesionales desde analizador de redes hasta clientes ligeros para el sector industrial. Desde el año 2006 se han creado varios modelos y tipos de Raspberry Pi. Aproximadamente cada 3 años sale un modelo nuevo y cada año, se mejora dicho modelo [2].

Raspberry Pi 1 modelo A (descontinuada). Fue el primer modelo de Raspberry, carecía de puerto Ethernet, por lo que para su conexión a Internet requería de un adaptador Wi-Fi por USB. Poseía 26 conectores GPIO, salida de vídeo vía HDMI y Video RCA, un conector Jack de 3.5 milímetros, un único conector USB, MicroUSB (De alimentación) y un conector de cámara. Su procesador fue un Broadcom BCM2835, Single-Core a 700MHz. También tuvo 256 MB de RAM y una gráfica Broadcom VideoCore IV. Requería de una fuente de alimentación de 5 voltios y 2 amperios, elemento común al resto de versiones. Tuvo un coste inicial de 40 euros [2].

Raspberry Pi 1 modelo B (descontinuada) y B +. Del año 2012, es una variante del Modelo A, incluía el doble de memoria RAM, pasando de 256MB a 512MB.

Trajo consigo un puerto USB más y un conector Ethernet (RJ-45). El Modelo B +, incluyó 4 puertos USB y pasó de usar una SD a una MicroSD [2].

Raspberry Pi 2 modelo B. Lanzada en 2014 sustituye su procesador por uno de la misma marca, modelo BCM2836. Pasa de ser de un núcleo a cuatro, y de 700MHz a 900MHz. Dobla la cantidad de memoria RAM, pasando de 512MB a 1GB (Algo menos en realidad) esta memoria está compartida con la gráfica [2].

Raspberry Pi 3 modelo B. Aparece en el 2016, renueva procesador, una vez más de la compañía Broadcom, un Quad-Core, pero pasa de 900MHz a 1.20GHz. Incluye Wi-Fi y Bluetooth (4.1 Low Energy) sin necesidad de adaptadores [2].

Raspberry Pi 3 modelo B +. Apareció en marzo del 2018, cuenta con un nuevo procesador y mejor conectividad,58 así que pasa de tener 1.2Ghz a tener 1.4Ghz y en la conectividad inalámbrica incorpora doble banda a 2,4GHz y 5GHz, y su nuevo puerto Ethernet se triplica, pasa de 100 Mbits/s en el modelo anterior a 300 Mbits/s en el nuevo modelo, y cuenta con Bluetooth 4.2 (Low Energy) [2].

La Raspberry Pi 3 B+ cuenta con un GPIO de 40 pines, el cual permite el contacto con el mundo exterior, tanto por sensores como con actuadores, en este punto es importante conocer que el GPIO de Raspberry trabaja con un nivel de 3.3V, así que si quieres conectar sensores que operan a 5V necesitarás un conversor de niveles lógicos te recomendamos el MCI00582 comercializado por MCI Electronics. Debido que el procesador de la Raspberry Pi no tiene un conversor de analógico a digital integrado, por lo tanto, si quieres leer sensores analógicos de usar un conversor ADC externo, en MCI Electronics puedes conseguir uno con el código MCI01856. Además, cuenta con puertos de comunicación I2C, SPI y UART [1].

En la figura1 y tabla 1 se muestran especificaciones técnicas de la Raspberry utilizada para este trabajo.

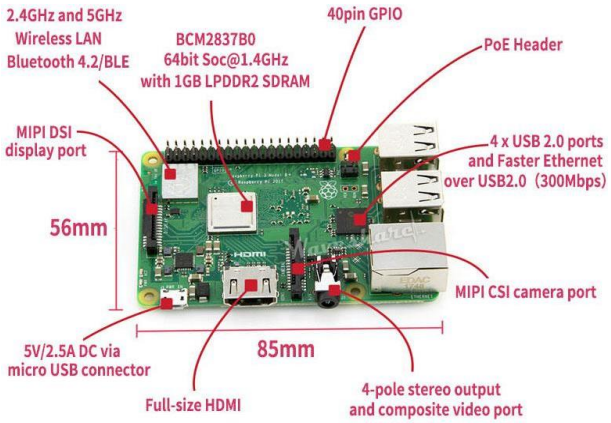


Figura 1. Configuración de entradas y salidas de la Raspberry pi 3B+ [3].

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la Raspberry Pi 3B+ [4].

Procesador	Broadcom BCM2837B0, Cortex A53 de 64 Bits - 1,4 [GHz]
Memoria	1 [GB] LPDDR2 SDRAM
Conectividad	2,4 [GHz] y 5 [GHz] IEEE 802.11 b/g/n/ac lan inalámbrico
	Bluetooth 4.2, BLE
	Gigabit ethernet - 300 Mbps
	4 puertos USB 2.0
Acceso	GPIO extendido de 40 pines
Video y sonido	1 puerto HDMI
	Puerto de display
	Puerto de cámara
	Salida de audio y video
Soporta tarjeta SD	Para almacenamiento de datos y carga del sistema operativo
Entrada	5 [V] / 2.5 [A] por conector micro USB
	5 [V] por el conector GPIO
Temperatura de operación	0 [°C] - 50 [°C]

Como hemos visto, la Raspberry Pi fue creada para reavivar la curiosidad de los estudiantes y de cualquier persona que se quiera acercar a la programación y las ciencias de la computación, sin necesidad de adquirir un computador costoso. Ya que si complementamos nuestra Raspberry Pi con los elementos de un ordenador básicamente es como si tuviéramos una computadora, pero a un menor costo donde podemos realizar las funciones elementales de un ordenador; además de programar [2].

El problema principal a resolver que tenemos, es que los estudiantes aún no se familiarizan con el uso de tarjetas de bajo costo y la integración de sensores y actuadores compatibles con la plataforma Arduino, así como con el manejo y la instalación de varios sistemas operativos similares a Windows o Mac, con este trabajo se pretende usar Ubuntu y Raspbian para lograr interconectar la tarjeta Raspberry Pi3b+ con varias tarjetas de Arduinos y adquirir datos para poder agruparlos y manejarlos estadísticamente hablando.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 8, pp. 95 - 108.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

2. Metodología

La elaboración de una plataforma de entrenamiento didáctica reconfigurable como tal es un proyecto con cierto grado de complejidad, sin embargo, puede seguirse una metodología general que facilite el proceso de construcción y programación. Para un desarrollo correcto de un dispositivo, previamente se requiere conocer el problema y las necesidades a solventar, así como las funciones que precisa realizar y los requisitos básicos.

A continuación, se describen los pasos generales a seguir para la integración de la misma:

- Definición de los requerimientos:
  - La problemática a solucionar con esta integración electrónica es poner al alcance de los estudiantes el diseño y la implementación de una plataforma de entrenamiento reconfigurable que permita la recolección de datos de diferentes sensores económicos compatibles con los modelos de tarjeta Arduino Uno y Mega, pero sin dejar de lado la fiabilidad en las mediciones y el coste económico del prototipo final. Para calibrar los dispositivos, si fuera necesario se opta por recurrir a la comparación de las lecturas con sistemas de referencia.

- Soporte electrónico:
  - Se debe diseñar una caja donde soportar y poder transportar los diferentes elementos que se necesitan para la integración y funcionamiento del prototipo funcional.

- Selección de componentes:
  - Se deben seleccionar los componentes necesarios para construir la plataforma reconfigurable, lo que incluye una pantalla táctil de siete pulgadas, teclado, mouse, cables usb, un módulo de carga o alimentación para alimentar el consumo de la Raspberry Pi y sus accesorios, placa de Arduino a utilizar, asi como materiales consumibles para la construcción del mismo.

- Construcción del prototipo:
  - Se debe fabricar una caja para montar y soportar la Raspberry Pi con una interfaz gráfica, en este caso será una pantalla de siete pulgadas por conexión hdmi, y con todos los accesorios necesarios para el buen funcionamiento del sistema operativo seleccionado, así como también permita tener cierta movilidad y protección de los mismos.

- Programación:
  - Se debe instalar el sistema operativo y las actualizaciones necesarias a la Raspberry para que realice las tareas específicas definidas en la fase de requerimientos, en este caso en particular la programación será en el IDE de Arduino.

- Pruebas y ajustes:
  - Se deben realizar pruebas para verificar que el sistema operativo funcione de manera correcta y el IDE de Arduino sea compatible. Se pueden realizar ajustes y mejoras en caso de ser necesario.

- Implementación:
  - Finalmente, se debe implementar el prototipo en el entorno en el que se va a utilizar y verificar la estabilidad del mismo, en este caso que no haya caídas de corriente y tensión al momento de conectar con las tarjetas de Arduino.

En la figura 2 se muestra el diagrama de flujo de la metodología general a seguir en este proyecto.

Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología general a seguir en el proyecto.

3. Desarrollo del prototipo

Se consideraron los siguientes requerimientos para la elaboración del prototipo de la plataforma de entrenamiento:

3.1 *Descripción de la problemática*

Integrar, programar y desarrollar una plataforma de entrenamiento reconfigurable con materiales que estuvieran al alcance de los estudiantes y que se pudieran conseguir en la región, con lo cual fuera posible realizar la adquisición y el manejo de datos en tiempo real.

3.2 Objetivo del prototipo

Poder realizar adquisición de datos mediante el uso de sensores compatibles con la tarjeta Arduino Uno y Mega, para posteriormente almacenar y realizar los análisis matemáticos y estadísticos pertinentes.

3.3 Requisitos del prototipo

3.3.1 Integración del prototipo

- Comunicación I²C: Es un protocolo de comunicación serial desarrollado por Phillips Semiconductors en la década de los 80s. Funciona con una arquitectura maestro-esclavo (master-slave), donde existen dos tipos de dispositivos [5].
  - Maestro (Master) o Controlador (Controller): son los que inician y coordinan la comunicación.
  - Esclavos (Slave) o Periféricos (Peripheral): son los dispositivos que están a la espera de que algún maestro se comunique con ellos. Casos comunes son los sensores y actuadores que soportan este protocolo, aunque también es posible, y en ocasiones necesario, que un microcontrolador se comporte como un esclavo. En la siguiente figura se aprecia el esquema de conexión habitual para conectar dispositivos empleando el protocolo I²C.

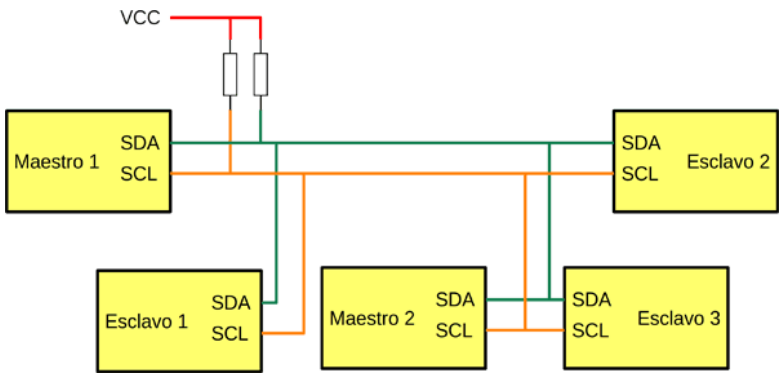


Figura 3. Esquema de conexión I²C [5].

Únicamente se precisa de dos pines para la comunicación, es decir, todos los dispositivos se conectan a los mismos cables: SDA (Serial Data): utilizado para el intercambio de datos. SCL (Serial Clock): empleado como señal de reloj. Se destaca la importancia de las resistencias Pull-up ubicado en ambos pines, gracias a estas la comunicación funciona correctamente, ya que el I²C es un bus de colector abierto. La velocidad de comunicación de datos va de 100 kbps hasta 3,4Mbps [6].

- Sensores: para este caso en particular se usaron los siguientes:
  - Reloj en tiempo Real

    El reloj en tiempo real (RTC) en serie DS1307 es un reloj/calendario de baja potencia (Figura 4). El reloj/calendario proporciona información de segundos, minutos, horas, día, fecha, mes y año. La fecha de fin de mes se ajusta automáticamente para los meses con menos de 31 días, incluyendo correcciones para el año bisiesto. El reloj funciona en formato de 24 horas o de 12 horas con indicador AM/PM. El DS1307 tiene un circuito de detección de energía integrado que detecta los fallos de alimentación y cambia automáticamente a la fuente de alimentación de reserva. El funcionamiento del reloj continúa mientras la pieza funciona con la fuente de alimentación de reserva [7].

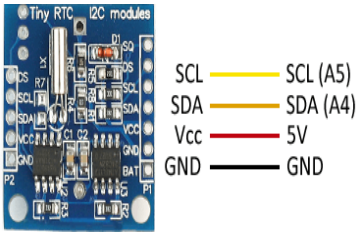


Figura 4. RTC módulo DS1307 [7].

- Sensor DHT11

  Utilizar el sensor DHT11 (Figura 5) con las plataformas Arduino/Raspberry Pi/Nodemcu es muy sencillo tanto a nivel de software como hardware. A nivel de software se dispone de librerías para Arduino con soporte para el protocolo "Single bus". En cuanto al hardware, solo es necesario conectar el pin VCC de alimentación a 3-5V, el pin GND a Tierra (0V) y el pin de datos a un pin digital en nuestro Arduino. Si se desea conectar varios sensores DHT11 a un mismo Arduino, cada sensor debe tener su propio pin de datos. Quizá la única desventaja del sensor es que sólo se puede obtener nuevos datos cada 2 segundos. Cada sensor es calibrado en fabrica para obtener unos coeficientes de calibración grabados en su memoria OTP, asegurando alta estabilidad y fiabilidad a lo largo del tiempo [8]9].

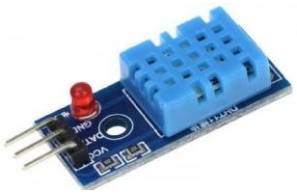


Figura 5. Sensor de humedad y temperatura DHT11 [8].

- Sensor BMP180

  El sensor de presión barométrica BMP180 (Figura 6), permite medir la altura respecto al nivel del mar, su funcionamiento está basado en la relación entre presión del aire y la altitud. El BMP180 posee alta precisión y de bajo consumo de energía. Ofrece un rango de medición desde 300 a 1100 hPa (Hecto Pascal), con una precisión absoluta de hasta 0,03 hPa. Basado en tecnología piezo-resistiva de BOSCH con robustez EMC, alta precisión y linealidad, así como con estabilidad a largo plazo. Diseñado para ser conectado directamente a un microcontrolador a través de I^2C utilizando solo 2 líneas [[8]10].

Figura 6. Sensor BMP180 [9].

- Sensor MPU6050

  Cuenta con tres convertidores de analógico a digital (ADC) de 16 bits para digitalizar las salidas del giroscopio y tres ADCs de 16 bits para digitalizar las salidas del acelerómetro. Para un seguimiento preciso tanto rápido como lento de movimientos, las partes cuentan con un giroscopio programable por el usuario a escala completa de ± 250, ± 500, ± 1000, y ± 2000 ° / seg. (Dps) y un rango de escala completa de acelerómetro programable por el usuario de ± 2g, ± 4g, ± 8g y ±16g (Figura 7) [10].

Figura 7. Sensor MPU6050 [10].

- Sensor TSL2561

  El TSL2561 (Figura 8) es un convertidor de luz digital que transforma la intensidad de la luz a una señal de salida capaz de dirigir a una interfaz I2C. Permite detectar rangos de luz de hasta 0.1-40,000 Lux. La información detallada de conexión y código de programación en el IDE de Arduino se consultó en el sitio oficial de Sparkfun [11].

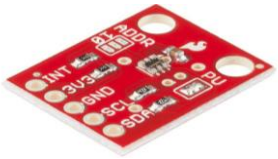


Figura 8. Sensor TSL2561 [11].

- Interfaz del IDE de Arduino

  El IDE es un conjunto de herramientas de software que permiten a los programadores desarrollar y grabar todo el código necesario para hacer que la placa Arduino funcione. El IDE de Arduino permite escribir, depurar, editar y grabar el programa (llamados “sketches” en el mundo Arduino) de una manera sumamente sencilla, en gran parte a esto se debe el éxito de Arduino, a su accesibilidad [12].

Figura 9. Interfaz del IDE de Arduino [12].

- Arduino

  El microcontrolador Arduino es una placa compuesta por un microcontrolador ATMEL, permitiendo la realización de instrucciones que pueden ser guardada en sus diferentes tipos de memoria para ello es necesario hacer uso del lenguaje de programación con el cual opera Arduino conocido como IDE el cual permite realizar instrucciones básicas de funcionamiento. Por lo general este microcontrolador posee una interfaz de entrada que interconecta con diferentes tipos de periféricos mediante sus diferentes pinouts de conexión, así como su debida forma de programación para la operatividad de los dispositivos [13].

4. Resultados

4.1 Integración y pruebas de la plataforma de entrenamiento

En la siguiente sección se mostrará una serie de figuras donde se explicará el proceso que se llevó hasta llegar a la integración de la plataforma de entrenamiento reconfigurable. Se usa el kit básico

del cual se compone la plataforma de entrenamiento, una Raspberry Pi 3B+,un Arduino Uno y Mega, un ventilador a 5 Volts con 4 disipadores de aluminio para disipar el calor generado por la placa, una caja de metal para trasportar todos los elementos, una fuente de alimentación de 5v a 2.5 amperes tipo usb, una pantalla lcd de siete pulgadas touch, mouse y teclado inalámbricos, varios cables hdmi y micro usb y 2 tarjetas microSD de capacidad de 16 y 32 Gigas, para el montaje de los sistemas operativos a utilizar, en este caso fueron Linux Ubuntu Mate 22.04 y Rapbian Debian Bullseye. En la figura 10 se muestran a detalle.

Figura 10. Kit básico de la plataforma de entrenamiento reconfigurable.

En la figura 11 se muestra la primera ejecución del IDE Arduino desde Ubuntu Mate 22.04.

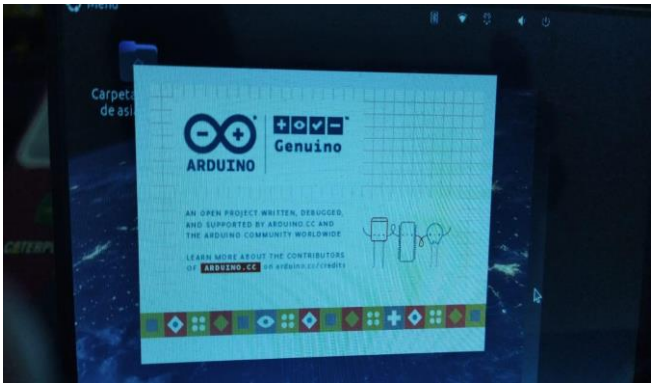


Figura 11. Primera ejecución del IDE Arduino en Ubuntu Mate 22.04.

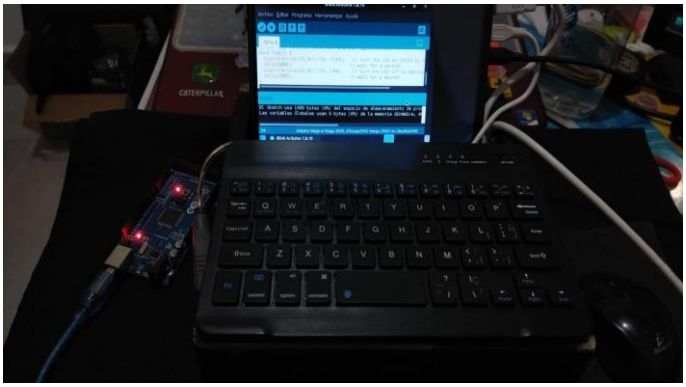


Figura 12. Visualización del IDE Arduino enlazado al Arduino Mega 2560.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 8, pp. 95 - 108.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

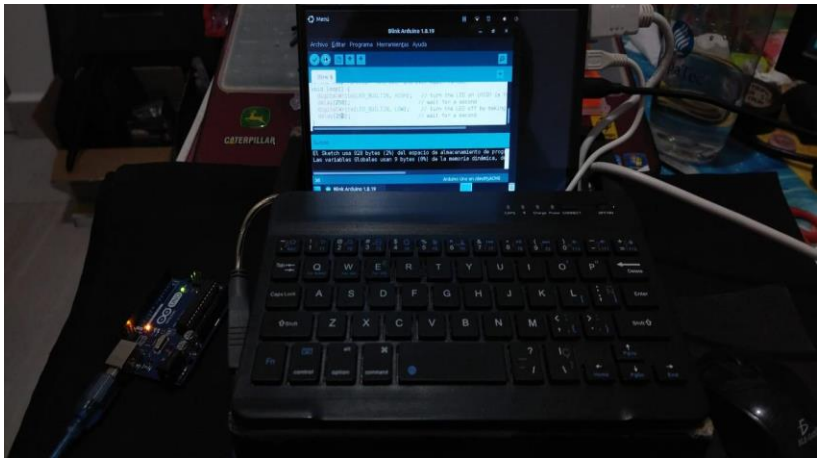


Figura 13. Visualización del IDE Arduino enlazado al Arduino Uno.

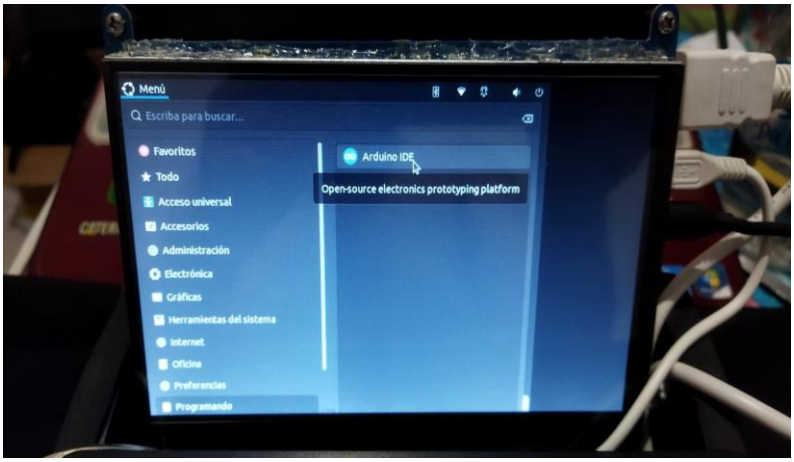


Figura 14. Visualizacion del IDE Arduino desde el menú principal de Ubuntu Mate 22.04.

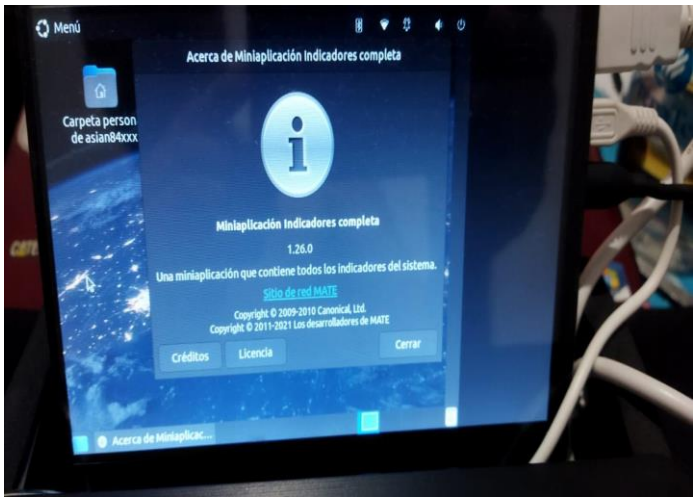


Figura 15. Ubuntu Mate completa corriendo desde la Raspberry Pi 3B+.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 8, pp. 95 - 108.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

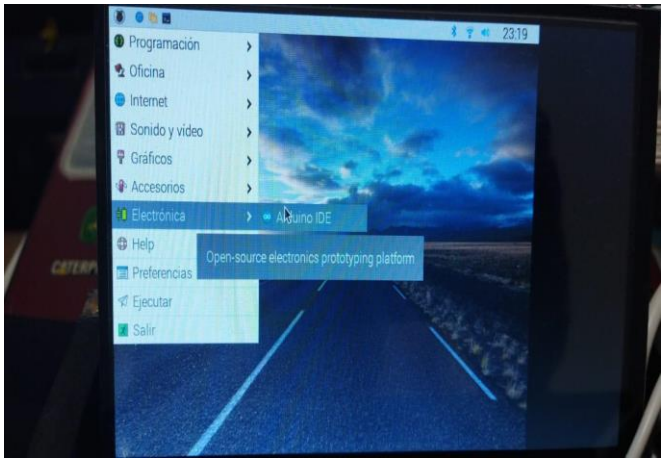


Figura 16. Visualización de IDE Arduino desde el menú principal de Raspbian.

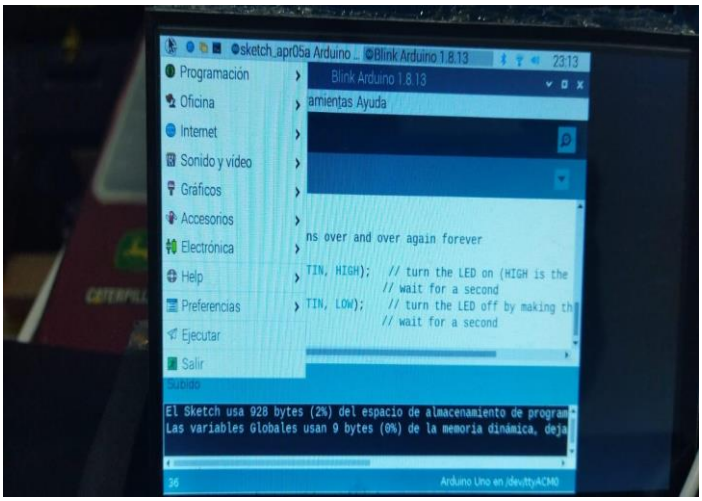


Figura 17. IDE Arduino ejecutándose desde Raspbian.

Figura 18. Visualización del IDE Arduino enlazado al Arduino Uno.

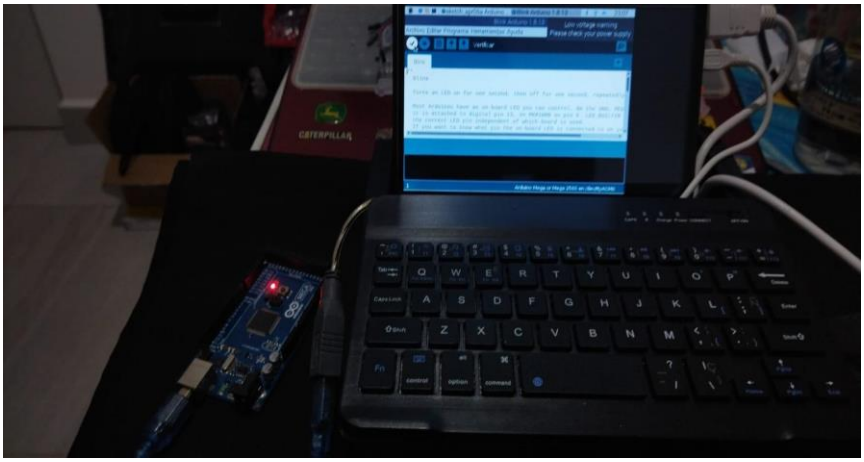


Figura 19. Visualización del IDE Arduino enlazado al Arduino Mega 2560.

Como se pudo apreciar en las figuras anteriores se logró tener comunicación con ambas tarjetas de Arduino de una manera correcta a pesar de que la memoria ram de la Raspberry es limitada cumplió con las funciones básicas para trabajar e inclusive ambos sistemas operativos se pudieron actualizar sin inconvenientes de espacio o velocidad.

En cuanto a las pruebas de software y hardware se llegó a los siguientes resultados:

La instalación de Ubuntu Mate inicialmente ocupa más espacio de almacenamiento aproximadamente 2 Gigabytes de espacio en la memoria SD, que la de Raspbian que solo ocupa 950 Megabytes, ambas se pudieron actualizar mediante línea de comando con los comandos básicos de Linux por mencionar algunos:

sudo apt update /actualiza la lista de paquetes disponibles para actualizar.
sudo apt - get upgrade /actualiza todos los paquetes disponibles para la versión instalada.
sudo reboot /resetea el sistema operativo después de isntalar los paquetes.

Anteriormente era necesario realizar una serie de pasos para poder utilizar la pantalla lcd de siete pulgadas, sin embargo, con ambas distribuciones no fue necesario realizar pasos extras, tampoco para conectar el mouse y el teclado inalámbrico.
Se ajustó la velocidad de la Raspberry a 128 Megabytes de memoria, con esto para no acaparar la memoria ram limitada que trae este modelo y que la Rarpberry pudiera responder de manera fluida.

En cuanto a la instalación del IDE de Arduino no hubo mayor complicación, pues una vez que ya se había configurado la Raspberry únicamente nos dirigimos al apartado de agregar o remover software y en la búsqueda solo tecleamos Arduino, seleccionamos el primer archivo, nos pedirá usuario y contraseña y esperamos a que se descargue instale el paquete.

Una vez que se tuvo instalado se hicieron las pruebas de ejecución y comunicación con las tarjetas de arduino y como tal con Raspbian se pudo trabajar de manera más fluida, al ocupar menos recursos y ser un software nativo para la Raspberry, el reconocimiento del Arduino y la compilación de los códigos fue más fluida y cabe mencionar que ambas distribuciones se comunicaron sin problemas y a la primera con las tarjetas de Arduino seleccionadas.

En cuanto a la integración de todos los elementos, las carcasas o cajas que contienen la electrónica esta se hizo con materiales meramente reciclados, para la evolución de este prototipo se pretende que el rediseño se haga mediante manufactura aditiva o impresión 3D.
El prototipo de plataforma reconfigurable fue probado por un grupo de 30 estudiantes los cuales nos comentaron lo siguiente:

Tabla2. Encuesta de aceptación y uso del prototipo de la plataforma reconfigurable.

Preguntas de encuesta	Número de estudiantes que contestaron que "Si"	Número de estudiantes que contestaron que "No"	Observaciones
¿Es atractivo el prototipo?	25	5	Ninguna
¿Pudiste programar tu Arduino?	26	4	Muy sencillo de conectar
¿Conocías más distribuciones de software Linux y Raspberry?	15	15	Solo Windows y Android
¿Sabes programar en el IDE de Arduino?	20	10	Ninguna
Sabes usar una Raspberry	10	20	Es la primera vez
¿Te es accesible comprar esta tecnología?	15	15	En equipo si, en individual no
¿La combinación de ambas tarjetas lo habías hecho antes?	5	25	No sabía que se podía hacer eso
¿Te gustaría que el proyecto siga creciendo?	30	0	Ninguna
¿Te gustaría aprender a usar esta tecnología para complementar proyectos?	30	0	Aplicarlo a los proyectos de la carrera
¿Te gustaría conocer más de esta tecnología?	26	4	Desarrollar mi propia plataforma de pruebas

5. Conclusiones

Durante el desarrollo de este proyecto los estudiantes lograron comprender que existen varios sistemas operativos distintos a Windows y Mac, además que hay tarjetas más económicas que se pueden utilizar como micro computadoras para tareas específicas las cuales no tienen un costo elevado y se pueden combinar con el uso de las diferentes tarjetas que ha desarrollado Arduino, como tal esta plataforma de entrenamiento se logró configurar para que fuera funcional con Linux y con Raspbian, se logró programar dos modelos de tarjeta de Arduino, el Uno y el Mega de una manera fluida.Con este trabajo podemos concluir que los estudiantes lograron comprender y entender que se puede fabricar una plataforma reconfigurable de bajo costo, para obtener datos con alguna tarjeta de Arduino, la cual es solo de entrenamiento básico sin embargo van obteniendo experiencia en el manejo de señales, adquisición de datos y manejo de los métodos estadísticos para el tratamiento los datos obtenidos.

Se logró resolver el problema que se había planteado al inicio de este trabajo, después de varios meses de pruebas y entrenamiento, los estudiantes involucrados lograron aprender a instalar software libre en este caso Ubuntu Mate y Raspbian, comprendieron que se puede interconectar una Raspberry con las tarjetas de Arduino e inclusive están trabajando en un siguiente prototipo donde ya no sea necesario conectarlo, únicamente trabajar con los puertos GPIO que contiene la plataforma de entrenamiento.

Es necesario que los estudiantes exploren los distintos sistemas operativos que existen en la actualidad para que no se queden con la idea que solo desde Windows o Mac se pueden resolver necesidades de integración a bajo costo y con pocos recursos.

Es necesario seguir realizando mejoras en la plataforma de entrenamiento e inclusive ir pensando en adquirir la versión más reciente de Raspberry por el detalle de la memoria ram, lo cual

permitiría realizar prácticas e implementaciones más complejas con lo cual se pueda abordar de una manera más seria y robusta implementaciones relacionadas con el internet de las cosas y la industria 4.0.

Referencias

[1] https://raspberrypi.cl/que-es-raspberry/.
[2] Olivia Vázquez-Bautista, Raspberry Pi, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa3/issue/archiveCon-Ciencia Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 3Publicación semestral, Vol. 9, No. 18 (2022) 36-40.
[3] jecrespom, «Manejar GPIO Raspberry Pi», Aprendiendo Arduino, 4 de marzo de 2020. https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2020/03/04/manejar- gpio-raspberry-pi/
[4] «Raspberry Pi 3 B+ Pinout with GPIO functions, Schematic and Specs in detail». https://www.etechnophiles.com/raspberry-pi-3-b-pinout-with-gpio- functions-schematic-and-specs-in-detail/
[5] J. Guerra Carmenate, «Comunicación I2C con Arduino lo mejor de dos mundos», Programarfacil, 2022. https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/comunicacion-i2c-con-arduino/
[6] Jonathan Chamba Benítez, Diseño de una estación meteorológica de bajo coste orientada al internet de las cosas, Trabajo Fin de Grado, Escuela Universitaria Politécnica La Almunia de Doña Godina (Zaragoza), Noviembre 2022.
[7] MAXIM. (2015). DS1307 64X8, Serial, I ² C Real-Time-Clock. In.
[8] Sensor DHT11,https://media.naylampmechatronics.com/2570-superlarge_default/sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht11
[9] Sensor BMP180, Fuente:https://media.naylampmechatronics.com/664-superlarge_default/sensor-de-presion-bmp180.
[10] TDK INVENSENSE,» 2003. [En línea]. Available: https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/.
[11] Sparkfun (2018). SparkFun Luminosity Sensor Breakout - TSL2561. SEN-12055 - SparkFun Electronics. Disponible en: https://www.sparkfun.com/products/retired/12055.
[12] «Software de Arduino,» [En línea]. Available: https://arduino.cl/programacion/.
[13] Ingrid A. García Torres, Dispositivo para Relajación muscular con puntos de presión utilizando Arduino Uno, Editorial Saberes del Conocimiento, Revista RECIMUNDO, ISSN: 2588-073X, Artículo de investigación, CÓDIGO UNESCO: 32 Ciencias Médicas PAGINAS: 163-172 Ecuador.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 9, pp. 109 – 122
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Estación meteorológica reconfigurable con Arduino Uno

Reyes de la torre Ángel[1]✉, Saguilan Guerra José Manuel[1], Horta Martínez Daniel Emiliano[1], Ramírez Rangel Noel Servando[1], Rico Bravo Juan Carlos[1], Maganda Carvajal Jaime Alberto[1], Beltrán Medina Paulina Karely[2], Pérez Orozco Juan Adrián[1]

[1]Tecnológico Nacional de México, Campus Querétaro.
[2]Universidad Tecnológica de Querétaro
✉19141332@queretaro.tecnm.mx

Resumen

El objetivo de este proyecto fue que los estudiantes de la materia de instrumentación de la carrera de mecatrónica del Tecnológico Nacional de México Campus Querétaro, pudieran realizar adquisición de datos ambientales mediante el uso de sensores analógicos y digitales, integrando el Arduino uno como tarjeta para el manejo de datos con lo cual fue posible almacenar y procesar los mismos para posteriormente manejarlos desde la computadora de una manera sencilla desde Excel o Matlab aplicando operaciones estadísticas para obtener el error y las gráficas de los datos para el muestreo realizado. Con lo cual se realizaron varias prácticas de caracterización, acondicionamiento y comparación de exactitud y precisión de sensores analógicos y digitales de bajo costo. Al integrar estos elementos, se logró obtener como proyecto de integración, una estación meteorológica funcional reconfigurable y de bajo costo con una arquitectura robusta reutilizable.

Palabras clave: Adquisición de datos, Estación meteorológica, Arduino uno, reconfigurable y económica.

1. Introducción

Una estación meteorológica es un dispositivo que se encarga de recopilar datos de distintas variables atmosféricas que son de suma importancia para la meteorología, por mencionar algunas, humedad, temperatura, presión atmosférica, intensidad lumínica entre otras, Estas se pueden instalar en cualquier terreno y existen diferentes tipos de estaciones de las cuales sus funciones son una estructura de nivel estandarizado.

En la relación sobre lo que se entiende por las estaciones meteorológicas, estas brindan un pronóstico meteorológico en donde los medios de comunicación son el último eslabón de una cadena de esfuerzos globales colectivos en medir, transmitir y procesar una amplia cantidad de información que proviene de numerosas fuentes [1].

Según la Organización Mundial de Meteorológica de aquí en adelante (OMM), nos dice que existen más de 10.000 estaciones meteorológica de superficie, 1000 estaciones en altitud, 7000 buques, 100 boyas fondeadas y 1000 boyas a la deriva, cientos de radares meteorológico y 3000 aeronaves comerciales especialmente equipadas miden a diario parámetros clave de la atmosfera, la tierra y la superficie [2]. Arduino es un tipo de microcontrolador creado mediante plataforma de código abierto el cual mediante procesos embebidos de componentes electrónicos y su integración con diferentes arquitecturas mejora los procesos de despliegue y uso [3].

Arduino tiene como fin, desarrollar una serie de proyectos mediante pequeñas placas con el fin de mejorar los procesos, sino que también fortalecer la enseñanza mediante plataforma libre es decir fácil de distribuir y explicar al público en general sin tener consideraciones como niveles de licencia o

suscripción de uso permitiendo el despliegue del dispositivo sin requerir de pagos en cuanto a licencias o integración con terceros [4].

El microcontrolador Arduino es una placa compuesta por un microcontrolador ATMEL, permitiendo la realización de instrucciones que pueden ser guardada en sus diferentes tipos de memoria para ello es necesario hacer uso del lenguaje de programación con el cual opera Arduino conocido como IDE el cual permite realizar instrucciones básicas de funcionamiento. Por lo general este microcontrolador posee una interfaz de entrada que interconecta con diferentes tipos de periféricos mediante sus diferentes pinouts de conexión, así como su debida forma de programación para la operatividad de los dispositivos [4].

Un factor importante a considerar es que se puede conectar una gran variedad de componentes desde cámaras web, teclados o sensores, [5].

Como tal el objetivo de este proyecto es que los estudiantes adquieran datos del medio ambiente con los sensores comerciales analógicos y digitales, puedan recolectar datos de parámetros meteorológicos de manera precisa y exacta en medida de lo posible.

2. Metodología

La elaboración de una estación meteorológica como tal es un proyecto con cierto grado de complejidad, sin embargo, puede seguirse una metodología general que facilite el proceso de construcción y programación (Figura 1). Para un desarrollo correcto de un dispositivo, previamente se requiere conocer el problema y las necesidades a solventar, así como las funciones que precisa realizar y los requisitos.

A continuación, se describen los pasos generales a seguir para la integración de la misma:

- Definición de los requerimientos:
  - La problemática a solucionar con esta integración electrónica es poner al alcance de las personas una estación meteorológica de bajo coste que permita la recolección de parámetros meteorológicos de manera precisa y exacta en medida de lo posible, para la medición de la temperatura, humedad, presión y cantidad lumínica es importante simplificar la cantidad de sensores utilizados para reducir tanto el consumo energético como el espacio utilizado, pero sin dejar de lado la fiabilidad en las medidas y el coste económico del prototipo final. Para calibrar los dispositivos, si fuera necesario se opta por recurrir a la comparación de las lecturas con sistemas de referencia.

- Selección de componentes:
  - Se deben seleccionar los componentes necesarios para construir el prototipo de medición de variables atmosféricas, lo que incluye la selección de sensores, módulo para lectura de tarjeta micro SD, módulo LCD (pantalla de cristal líquido), módulo RTC (Reloj en tiempo real) la placa de Arduino a utilizar, así como materiales consumibles para la construcción del mismo

- Diseño electrónico:
  - Se debe diseñar una placa fenólica perforada o riel de conexiones rápidas, donde se puedan montar y sustituir los sensores o componentes y si es posible diseñarlo pensando en actualizaciones futuras o mejoras del prototipo, para usar en lo menor posible cable, esto para optimizar espacio y poder compactar el montaje final.

- Construcción del prototipo:
  - Se deben soldar algunos componentes a la placa o riel principal y ensamblar los sensores y demás componentes necesarios para el correcto funcionamiento del dispositivo.

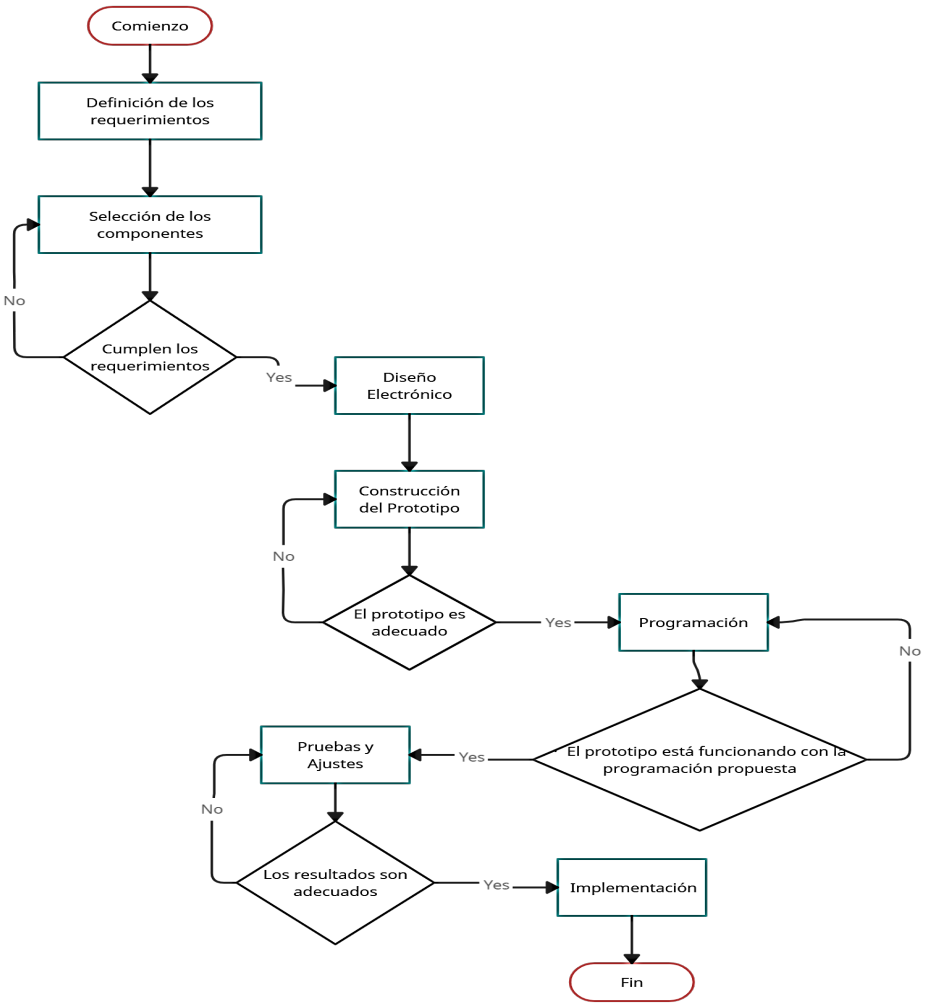


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología

- Programación:
  - Se debe programar la integración de sensores para que realice las tareas específicas definidas en la fase de requerimientos, en este caso en particular la programación será en el IDE de Arduino.
- Pruebas y ajustes:
  - Se deben realizar pruebas para verificar que el prototipo de mediciones ambientales o meteorológicas funciona correctamente y cumple con los requerimientos establecidos. Se pueden realizar ajustes y mejoras en caso de ser necesario.
- Implementación:
  - Finalmente, se debe implementar el prototipo en el entorno en el que se va a utilizar y verificar que su error en las mediciones recopiladas no tenga desviaciones o errores en la programación y se generen datos erróneos.

3. Desarrollo del prototipo

Se consideraron los siguientes requerimientos para la elaboración del prototipo de estación meteorológica:

3.1 *Descripción de la problemática*

Integrar, programar y desarrollar una estación meteorológica con sensores y materiales que estuvieran al alcance de los estudiantes que se pudieran conseguir en la región, con lo cual fuera posible realizar la adquisición y el manejo de datos meteorológicos en tiempo real.

3.2 Objetivo del prototipo

Poder realizar adquisición de datos mediante el uso de sensores compatibles con la tarjeta Arduino Uno, para posteriormente almacenar y realizar los análisis matemáticos y estadísticos pertinentes.

3.3 Requisitos del prototipo

3.3.1 Integración del prototipo

- Comunicación I^2C: Es un protocolo de comunicación serial desarrollado por Phillips Semiconductors en la década de los 80s. Funciona con una arquitectura maestro-esclavo (master-slave), donde existen dos tipos de dispositivos [6]:
  - Maestro (Master) o Controlador (Controller): son los que inician y coordinan la comunicación.
  - Esclavos (Slave) o Periféricos (Peripheral): son los dispositivos que están a la espera de que algún maestro se comunique con ellos. Casos comunes son los sensores y actuadores que soportan este protocolo, aunque también es posible, y en ocasiones necesario, que un microcontrolador se comporte como un esclavo. En la figura 2 se aprecia el esquema de conexión habitual para conectar dispositivos empleando el protocolo I^2C.

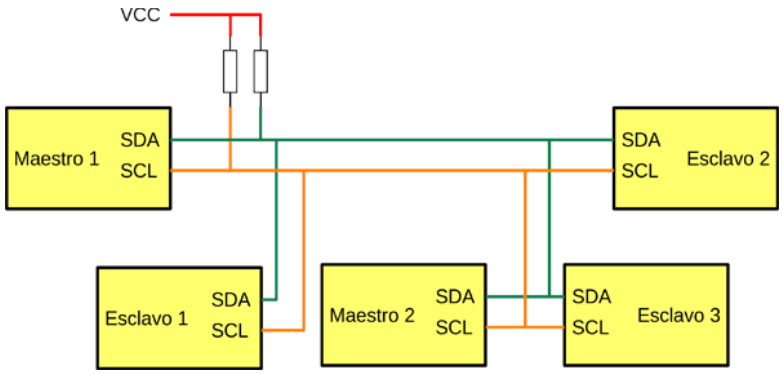


Figura 2. Esquema de conexión I^2C [6].

Únicamente se precisa de dos pines para la comunicación, es decir, todos los dispositivos se conectan a los mismos cables: SDA (Serial Data): utilizado para el intercambio de datos. SCL (Serial Clock): empleado como señal de reloj. Se destaca la importancia de las resistencias Pull-up ubicado en ambos pines, gracias a estas la comunicación funciona correctamente, ya que el I^2C es un bus de colector abierto. La velocidad de comunicación de datos va de 100 kbps hasta 3,4Mbps [7].

3.3.2 Selección de los sensores

- Sensores: para este caso en particular se usaron los siguientes:
  - Reloj en tiempo Real

    El reloj en tiempo real (RTC) en serie DS1307 es un reloj/calendario de baja potencia (figura 3). El reloj/calendario proporciona información de segundos, minutos, horas, día, fecha, mes y año. La fecha de fin de mes se ajusta automáticamente para los meses con menos de 31 días, incluyendo correcciones para el año bisiesto. El reloj funciona en formato de 24

horas o de 12 horas con indicador AM/PM. El DS1307 tiene un circuito de detección de energía integrado que detecta los fallos de alimentación y cambia automáticamente a la fuente de alimentación de reserva. El funcionamiento del reloj continúa mientras la pieza funciona con la fuente de alimentación de reserva [8].

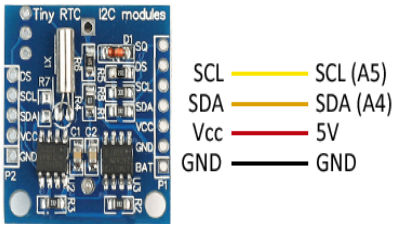


Figura 3. RTC módulo DS1307 [8].

- Sensor DHT11

  Utilizar el sensor DHT11 (figura 4) con las plataformas Arduino/Raspberry Pi/Nodemcu es muy sencillo tanto a nivel de software como hardware. A nivel de software se dispone de librerías para Arduino con soporte para el protocolo "Single bus". En cuanto al hardware, solo es necesario conectar el pin VCC de alimentación a 3-5V, el pin GND a Tierra (0V) y el pin de datos a un pin digital en nuestro Arduino. Si se desea conectar varios sensores DHT11 a un mismo Arduino, cada sensor debe tener su propio pin de datos. Quizá la única desventaja del sensor es que sólo se puede obtener nuevos datos cada 2 segundos. Cada sensor es calibrado en fabrica para obtener unos coeficientes de calibración grabados en su memoria OTP, asegurando alta estabilidad y fiabilidad a lo largo del tiempo [9].

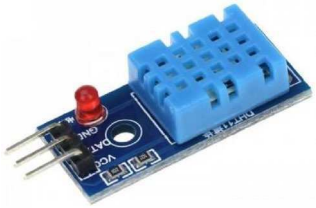


Figura 4. Sensor de humedad y temperatura DHT11 [9].

- Sensor BMP180

  El sensor de presión barométrica BMP180 (figura 5), permite medir la altura respecto al nivel del mar, su funcionamiento está basado en la relación entre presión del aire y la altitud. El BMP180 posee alta precisión y de bajo consumo de energía. Ofrece un rango de medición desde 300 a 1100 hPa (Hecto Pascal), con una precisión absoluta de hasta 0,03 hPa. Basado en tecnología piezo-resistiva de BOSCH con robustez EMC, alta precisión y linealidad, así como con estabilidad a largo plazo. Diseñado para ser conectado directamente a un microcontrolador a través de I^2C utilizando solo 2 líneas [10].

Figura 5. Sensor BMP180 [10].

- Sensor MPU6050

  Cuenta con tres convertidores de analógico a digital (ADC) de 16 bits para digitalizar las salidas del giroscopio y tres ADCs de 16 bits para digitalizar las salidas del acelerómetro (figura 6). Para un seguimiento preciso tanto rápido como lento de movimientos, las partes cuentan con un giroscopio programable por el usuario a escala completa de ± 250, ± 500, ± 1000, y ± 2000 ° / seg. (Dps) y un rango de escala completa de acelerómetro programable por el usuario de ± 2g, ± 4g, ± 8g y ±16g. [11].

.

Figura 6. Sensor MPU6050 [11].

- Sensor TSL2561

  El TSL2561 (figura 7) es un convertidor de luz digital que transforma la intensidad de la luz a una señal de salida capaz de dirigir a una interfaz I2C. Permite detectar rangos de luz de hasta 0.1-40,000 Lux. La información detallada de conexión y código de programación en el IDE de Arduino se consultó en el sitio oficial de Sparkfun [12].

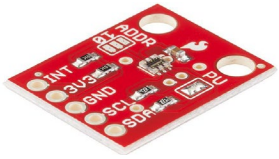


Figura 7. Sensor TSL2561 [12].

- Interfaz del IDE de Arduino

  El IDE de Arduino (figura 8) es un conjunto de herramientas de software que permiten a los programadores desarrollar y grabar todo el código necesario para hacer que la placa Arduino funcione. El IDE de Arduino permite escribir, depurar, editar y grabar el programa (llamados “sketches” en el mundo Arduino) de una manera sumamente sencilla, en gran parte a esto se debe el éxito de Arduino, a su accesibilidad [13].

Figura 8. Interfaz del IDE de Arduino [13].

3.4 Diseño electrónico y simulación.

En la siguiente sección se mostrará cómo se llevó a cabo el diseño previo, las pruebas y la implementación del prototipo, inicialmente se realizó un diagrama en Fritzing y de ahí se partió para realizar los demás cambios y adecuaciones que se realizaron durante el proceso de fabricación y programación del prototipo en la figura 9 se muestra el primer boceto en protoboard del diagrama.

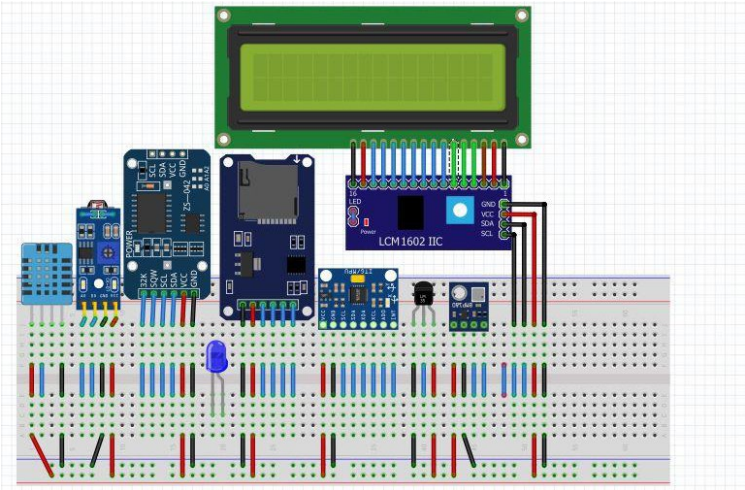


Figura 9. Primer Boceto previo a la programación de los sensores.

3.5 Construcción del Prototipo

Una vez que se revisó el diseño en placa fenólica y se hicieron las correcciones necesarias se procedió a fabricar el riel y a montar los sensores y accesorios necesarios, en las figuras 10 y 11 se muestran el montaje final del prototipo.

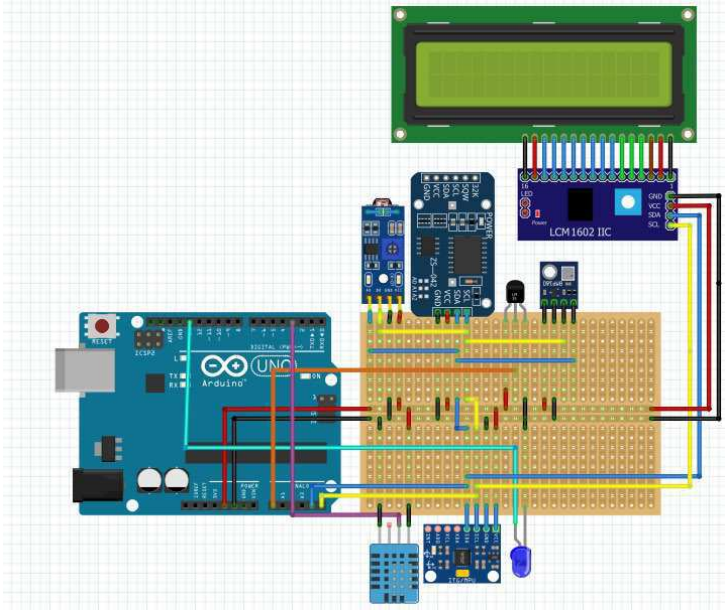


Figura 10. Boceto del riel para el montaje de los sensores y accesorios.

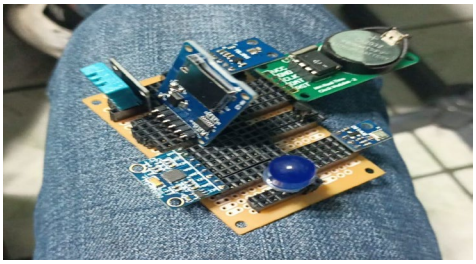


Figura 11. Riel de montaje inicial de sensores y componentes varios.

3.6 Programación

Una vez que se tuvo el diseño previo, se procedió a realizar la programación y el segundo diseño, pero ahora se realizó en placa fenólica. En la figura 12 se muestra parte de la programación que se realizó inicialmente y en la figura 10 se muestra el diseño en placa fenólica.

```
#define ENTRADA A0

#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include "MPU6050.h"
#include "Wire.h"
#include "TSL2561.h"
#include <virtuabotixRTC.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <SFE_BMP180.h>
#include <Wire.h>
#include <Time.h>
#include "DHT.h"
#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT11

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
virtuabotixRTC myRTC(6, 7, 8); // Si cambiamos los PIN de conexión, debemos cambiar aquí
tambien
int Ledpin=5;
SFE_BMP180 bmp180;
MPU6050 sensor;
TSL2561 tsl(TSL2561_ADDR_FLOAT);
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);

int led = 13;
int gx, gy, gz;
float tC;
float temps;
float hum = 0;
double alt = 0;
double pres = 0;
uint32_t lumen = 0;
int posx = 0;
int posy = 0;
int posz = 0;
int item = 0;
double PresionNivelMar = 1013.25;
```

Figura 12. Fragmento de la programación inicial de los sensores en Arduino.

3.7 Pseudocódigo

El código final se realizó gracias al preliminar de un pseudocódigo, donde se establece de manera más entendible lo que se programará finalmente (figura 13).

```
Constantes:
ENTRADA = A0
DHTPIN = 2
DHTTYPE = DHT11
PresionNivelMar = 1013.25
Variables:
Ledpin = 5
led = 13
gx, gy, gz
tC
temps
hum = 0
alt = 0
pres = 0
lumen = 0
posx = 0
posy = 0
posz = 0
item = 0
Modulos/ Librerías:
LiquidCrystal_I2C.h
MPU6050.h
Wire.h
TSL2561.h
virtuabotixRTC.h
SFE_BMP180.h
Time.h
DHT.h
Inicio setup()
Llamada: Serial.begin(9600)
Imprimir en consola:
"CLEARDATA"
"CLEARSHEET"
"LABEL,item,Sensor_LM35,Sensor_DHT11,Sensor_BMP180_A,Sensor_BMP180_P,Sensor_TSL2561,GX,GY,GZ
,Fecha,Hora"
"RESETTIMER"
Llamada: pinMode(ENTRADA, INPUT)
Llamada: pinMode(5,OUTPUT)
Llamada: myRTC.setDS1302Time(00, 00, 19, 5, 30, 03, 2023)
Llamada: bmp180.begin()
Llamada: dht.begin()
Llamada: lcd.init()
Llamada: sensor.initialize()
Llamada: lcd.backlight()
Fin setup()

Inicio loop()
Llamada: myRTC.updateTime()
Llamada: Metodo_LED()
item = item + 1
Llamada: temps = Sensor_LM35()
Llamada: hum = Sensor_DHT11()
```

Figura 13. Fragmento del pseudocódigo inicial.

```
Llamada: alt = Sensor_BMP180_A()
Llamada: pres = Sensor_BMP180_P()
Llamada: lumen = Sensor_TSL2561()
Llamada: posx = Sensor_Gyro_x()
Llamada: posy = Sensor_Gyro_y()
Llamada: posz = Sensor_Gyro_z()
Llamada: Metodo_PLXDAQ()
Llamada: Metodo_LCD()
Esperar 1000 milisegundos
Fin loop()

Función: Metodo_LED()
Establecer el valor de led a HIGH
Esperar 500 milisegundos
//digitalWrite(led,LOW)

Función: Metodo_LCD()
lcd.print("ITQ Norte")
Esperar 1000 milisegundos
lcd.clear()
lcd.print("Temperatura: ")
lcd.setCursor(0, 1)
lcd.print(temps)
Esperar 1000 milisegundos
lcd.clear()
lcd.print("Humedad: ")
lcd.print(hum)
Esperar 1000 milisegundos
lcd.clear()
lcd.print("Altitud: ")
lcd.print(alt)
Esperar 1000 milisegundos
lcd.clear()
lcd.print("Presion: ")
lcd.print(pres)
```

Figura 13 (cont.). Fragmento del pseudocódigo inicial.

4. Resultados

4.1 Pruebas y Ajustes

Se presentan las pruebas realizadas.

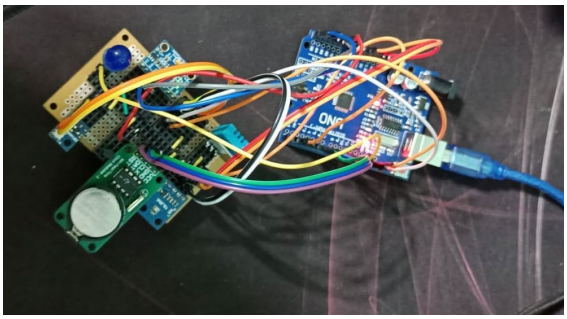


Figura 13. Primeras pruebas previo a conectar la LCD.

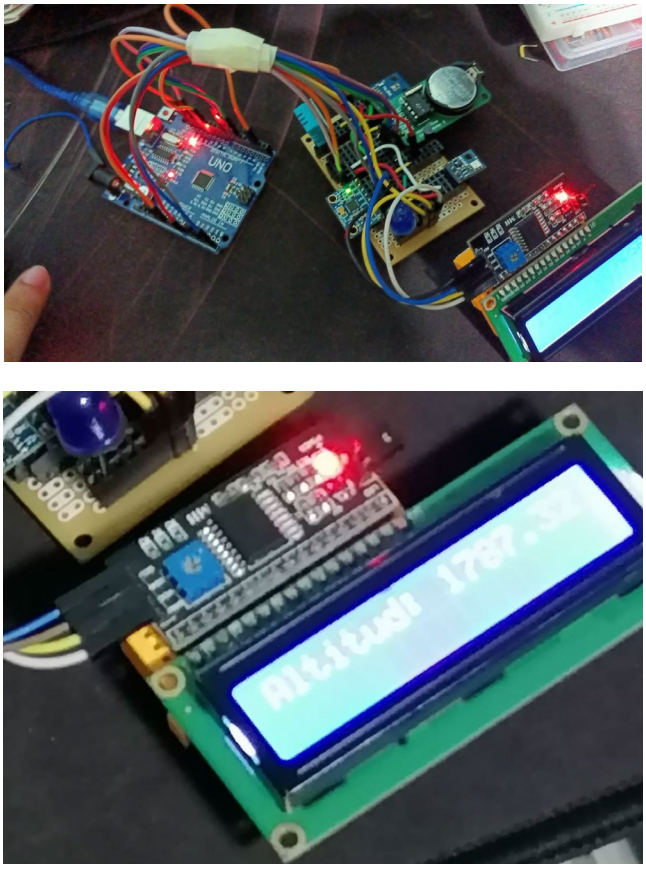


Figura 14. Primeras pruebas con la LCD.

4.2 Implementación

A continuación, se muestran las gráficas y tablas obtenidas del arreglo de sensores del prototipo de la estación meteorológica funcionando.

Tabla 1. Valores acumulados por cada sensor.

Sensor	Media	Moda	Límite inferior	Límite superior	Rango	Precisión	Exactitud	Error
Temperatura	25.459	25.57	21.91	25.78	3.87	0.2695	-5.7074	0.0191
Humedad	31.16	31	31	32	1	0.4663	3.8666	0.0330
Altitud	1792.4984	1801.72	1800.3	1802.66	2.36	0.4672	-1.5110	0.0331
Presión	810.6872	814.75	814.66	814.88	0.22	0.0465	-21.0625	0.0033
Lúmenes	76.845	93	5	96	91	23.9988	-17.3709	1.7012

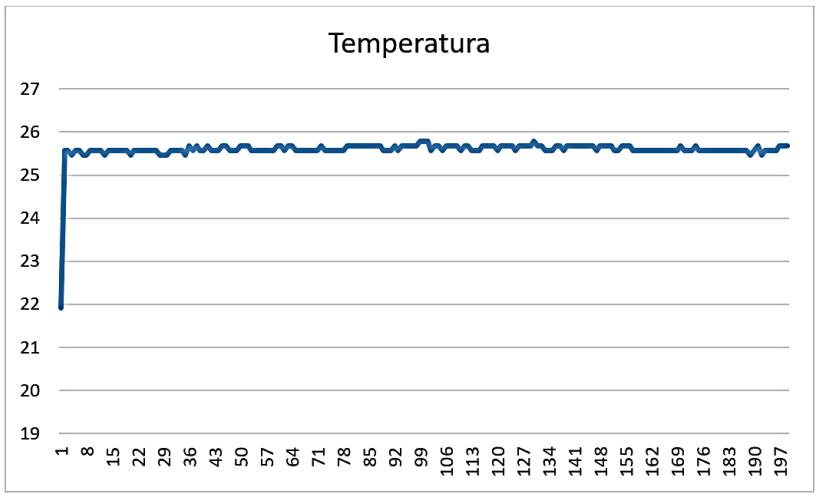


Figura 15. Gráfica de temperatura del sensor DHT11.

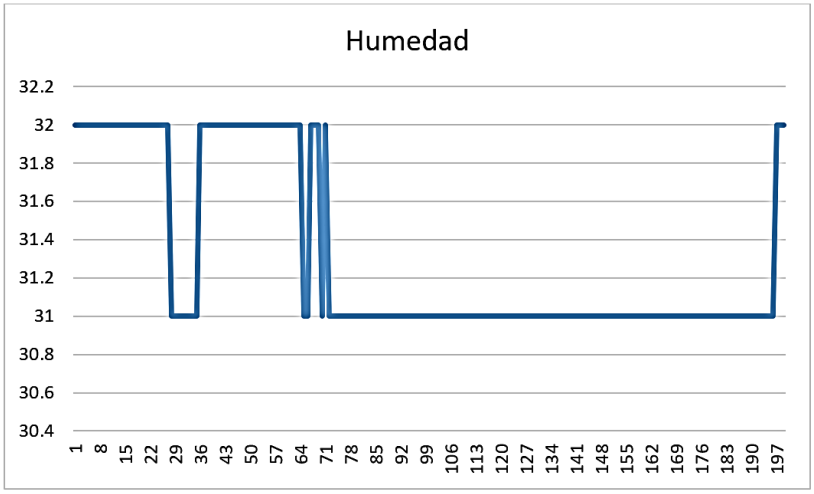


Figura 16. Gráfica de humedad del sensor DHT11.

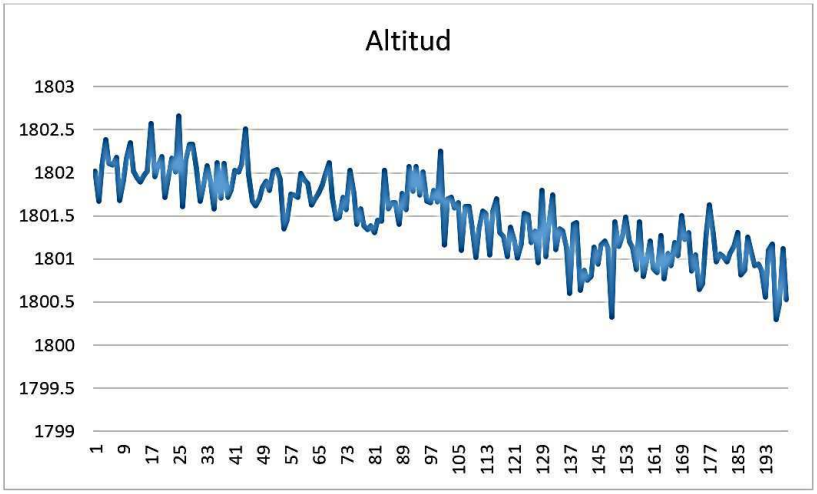


Figura 17. Gráfica Altura del sensor BMP180.

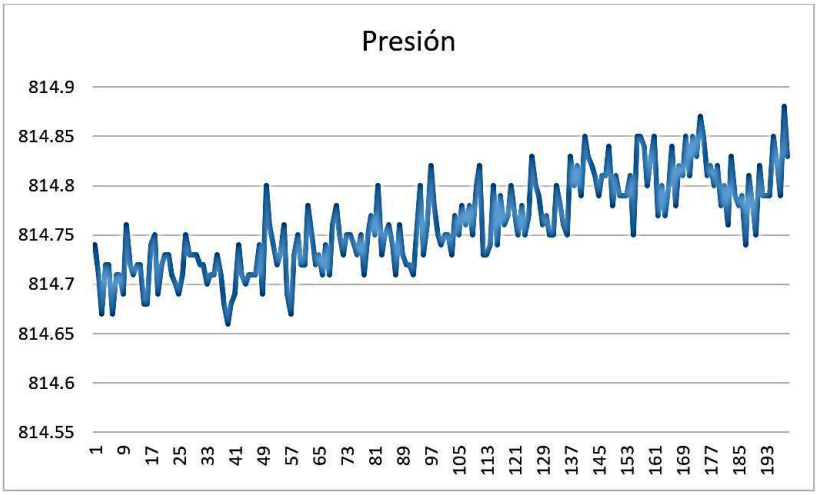


Figura 18. Gráfica presión barométrica del sensor BMP180.

5. Conclusiones

A lo largo del proyecto se pudo conocer y probar el funcionamiento de varios sensores con la finalidad de realizar una estación meteorológica la cual brinde datos como lo son temperatura, humedad, presión atmosférica, altitud, posición, lúmenes, fecha y hora en tiempo real, siendo el objetivo obtener los datos más apegados a la realidad, para ello se utilizaron los sensores (lm35, DHT11, BMP180, MPU6050 Giroscopio, TSL2561, RTC-DS3231, led y LCD 16x2) que cuentan con las características requeridas, para determinar un correcto funcionamiento de la misma, se realizó un muestreo y se incluyeron gráficos donde se puede observar el comportamiento de los datos recopilados y cálculos para verificar la viabilidad de la estación meteorológica, en estos cálculos se puede observar:

La precisión, la cual se encuentra en valores debajo de cero deduciendo que los resultados se acercan entre sí, con la excepción de los lúmenes cuya precisión se ve afectada a que se bloqueó la luz para probar su funcionamiento.

La exactitud en donde se puede observar valores variados en su mayoría negativos, pero de bajo valor, en el muestreo de la presión es en donde menor exactitud se tiene ya que se aleja a el dato real.

La repetibilidad es buena ya que todos los resultados a lo largo del muestreo se repiten bastante.

Y en el cálculo del error los resultados son debajo de cero, con lo que se puede concluir que los datos mostrados no se alejan demasiado a la realidad por lo que se determinó que la estación meteorológica tiene un correcto funcionamiento tomando en cuenta las variaciones que tienen los sensores de fábrica.

Con este trabajo podemos concluir que los estudiantes lograron comprender y entender que se puede fabricar una estación meteorológica de bajo costo, con alguna tarjeta de Arduino, la cual es solo de entrenamiento básico, y en cuanto a los sensores sin embargo existirá un porcentaje de error en comparación con los sensores y la electrónica de gama media alta que se utilizan de manera industrial.

Referencias

[1] Campetella, C., & Cerne, Bibiana, Salio, P. (2011). *Entornos invisibles, Estación Meteorológica*. 52.
[2] Barona-Posligua Héctor Darío, ESTACIÓN METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA Y MEDICIÓN DE VARIABLES ATMOSFÉRICAS, Revista Científica y Arbitrada del Observatorio Territorial, Artes y Arquitectura: FINIBUS. Vol. 5, Núm. 9 (ene - jun 2022) ISSN: 2737-6451.
[3] Ingrid Torrente, O. (2013). Arduino. Curso práctico de formación. México.
[4] Ingrid A. García Torres, Dispositivo para Relajación muscular con puntos de presión utilizando Arduino Uno, Editorial Saberes del Conocimiento, Revista RECIMUNDO, ISSN: 2588-073X, Artículo de investigación, CÓDIGO UNESCO: 32 Ciencias Médicas PAGINAS: 163-172 Ecuador.
[5] Oliverio, G., Ciardulli, M., Poli, V., & Nebiolo, M. (2012). Arduino libro de proyectos. Italia: ISBTEAM.
[6] J. Guerra Carmenate, Comunicación I2C con Arduino lo mejor de dos mundos, Programarfacil, 2022. https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/comunicacion-i2c-con-arduino/
[7] Jonathan Chamba Benítez, Diseño de una estación meteorológica de bajo coste orientada al internet de las cosas, Trabajo Fin de Grado, Escuela Universitaria Politécnica La Almunia de Doña Godina (Zaragoza), Noviembre 2022.
[8] MAXIM. (2015). DS1307 64X8, Serial, I ² C Real-Time-Clock. In.
[9] Sensor DHT11,https://media.naylampmechatronics.com/2570-superlarge_default/sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht11
[10] Sensor BMP180, Fuente:https://media.naylampmechatronics.com/664-superlarge_default/sensor-de-presion-bmp180.
[11] TDK INVENSENSE,» 2003. [En línea]. Available: https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/.
[12] Sparkfun (2018). SparkFun Luminosity Sensor Breakout - TSL2561. SEN-12055 - SparkFun Electronics. Disponible en: https://www.sparkfun.com/products/retired/12055.
[13] «Software de Arduino,» [En línea]. Available: https://arduino.cl/programacion/.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 10, pp. 123 – 135
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Diseño mecatrónico de un robot hexápodo explorador

Lugo Lugo Diego Roberto, Navarro Ríos Martin, Ramírez Rangel Noel Servando, Maganda Carvajal Jaime Alberto, Pérez Orozco Juan Adrián

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO, Campus Querétaro
jaime.mc@queretaro.tecnm.mx

Resumen

Este proyecto tiene como objetivo principal analizar y diseñar el comportamiento de un robot hexápodo para la exploración, el cual se pretende controlar de manera remota y en tiempo real a través de una conexión a Internet para visualizar los datos de los sensores y el video de la cámara. Para lograr esto, se ha elegido el microprocesador Broadcom BCM2837B0 Cortex-A53 como unidad central de procesamiento debido a su potencia y capacidad para procesar y transmitir datos en tiempo real. Además, este microprocesador cuenta con un alto rendimiento energético y un bajo consumo de energía, lo que lo hace ideal para un proyecto de robótica móvil. En cuanto a los servomotores, se han seleccionado los modelos mg995 debido a su alto torque y precisión en la rotación. Esto es fundamental para lograr el movimiento preciso y controlado de las patas del robot hexápodo en terrenos irregulares y accidentados durante la exploración. La estructura principal del robot está fabricada con acero estructural, debido a su alta resistencia y durabilidad. Asimismo, se ha incorporado una cámara de alta definición y sensores de temperatura, humedad, presión y distancia, entre otros, para recopilar información detallada del entorno.

Palabras clave: Robot, Hexápodo, Sensores, Microprocesadores, Exploración, Análisis, Diseño.

1. Introducción

Los robots hexápodos son usados para exploración en terrenos de difícil acceso humano donde las condiciones pueden poner en riesgo la vida, de tal manera que se pueda explorar y mapear el terreno, recopilando información valiosa que pueda ser utilizada para fines científicos, de investigación o de rescate. Este tipo de robots forman parte muy importante del área de la robótica.

La robótica se define como la ciencia que aglutina varias disciplinas o ramas de la tecnología con el objetivo de diseñar máquinas programadas para realizar tareas de forma automática o para simular el comportamiento humano o animal [1]. Esta disciplina se dedica a la construcción de artefactos que intentan materializar el deseo humano de crear seres a su semejanza y/o a semejanza animal para responder a algunas de sus necesidades más complejas y, también, para liberarse de trabajos tediosos o peligrosos [1]. El uso de la robótica para solucionar problemas laborales es cada vez más común debido a los avances en la tecnología y la automatización. Los robots pueden ser programados para realizar tareas repetitivas, peligrosas o de alta precisión, lo que permite que los trabajadores humanos se centren en tareas más creativas y desafiantes. Al usar robots en aplicaciones peligrosas, no solo tratamos de reducir la intervención humana, sino que también mejoramos la eficiencia, productividad y la calidad mediante la integración de la robótica. [2]. Por ejemplo, los robots pueden trabajar las 24 horas del día sin descanso, lo que permite una mayor producción en menor tiempo. También hay beneficios para la seguridad en el trabajo. Al utilizar robots para tareas peligrosas o insalubres, se reduce el riesgo de lesiones o enfermedades laborales para los trabajadores humanos. El uso de robots exploradores se ha convertido en una herramienta fundamental para la investigación científica y la exploración de lugares peligrosos o inaccesibles para los seres humanos. Los robots exploradores son diseñados y programados para recolectar datos, realizar mediciones, tomar muestras y enviar

información en tiempo real a los científicos y expertos que los controlan desde la distancia. Estos robots pueden ser utilizados para explorar áreas remotas del planeta, como los polos, las profundidades del océano o los lugares más inhóspitos del desierto. También se han utilizado para la exploración del espacio, incluyendo el estudio de planetas y lunas, la observación de estrellas y galaxias lejanas, y la investigación de asteroides y cometas. Además de la exploración científica, los robots exploradores también se han utilizado en operaciones de rescate y búsqueda, así como en la industria de la energía y la minería para inspeccionar y evaluar áreas peligrosas.

2. Metodología

La elaboración de un robot hexápodo puede ser un proyecto complejo, pero puede seguirse una metodología general que facilite el proceso de construcción y programación (figura 1). A continuación, se describen los pasos generales que se podrían seguir para la elaboración de un robot hexápodo:

- Definición de los requerimientos: Se debe definir el objetivo del robot hexápodo y las tareas específicas que se espera que realice. También es importante definir los requisitos de hardware y software necesarios para construir el robot y programarlo.

- Diseño mecánico: Se debe diseñar el esqueleto del robot hexápodo, lo que incluye la estructura, las patas y las articulaciones. Es importante considerar la estabilidad, el peso, la resistencia y la movilidad del robot durante el diseño, en este paso se consideran la Cinemática inversa y la Cinemática directa para determinar los valores de posición de las articulaciones requeridos para ubicar el extremo de cada cadena cinemática.

Figura 1. Diagrama de bloques de la metodología general del proyecto.

A continuación, se presentan los cálculos para una pata del lado izquierdo del robot. Sin embargo, los cálculos para una pata del lado derecho son idénticos, excepto por algunos cambios en la orientación y el signo de algunas componentes. Para resolver la cinemática, se han utilizado ciertos parámetros

auxiliares y se han identificado las posiciones angulares de cada articulación de la pata como q1, q2 y q3, siguiendo la numeración de la cadena cinemática de la extremidad, considerando el cuerpo del robot como el punto de origen de la cadena (figura 2).

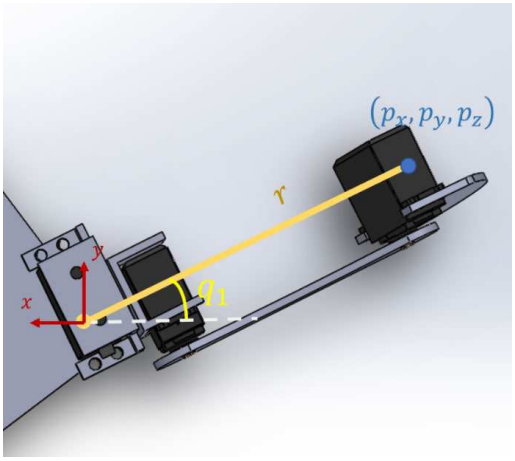


Figura 2. Sistema de referencia en pata izquierda.

La figura 3 muestra una vista inferior de la pata del robot, en la cual se puede ver el sistema de referencia y el valor de q1, así como también un parámetro auxiliar r que indica la distancia desde el origen hasta el extremo de la pata en el plano XY. La tupla (px, py, pz) indica las coordenadas del punto donde se encuentra el extremo de la pata con respecto al sistema de referencia de la misma.

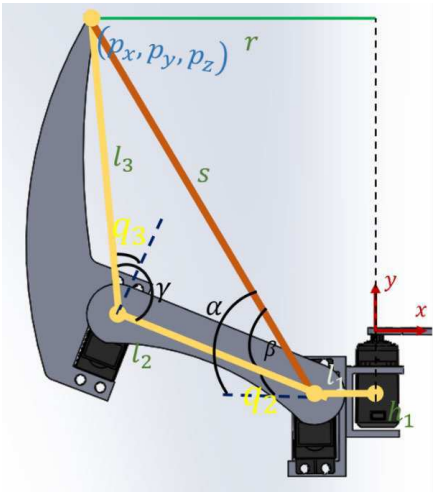


Figura 3. Parte contenida en un plano de la extremidad del robot.

En la imagen se muestra una sección del plano de la extremidad del robot. En este caso, la geometría es más compleja debido a la existencia de dos grados de libertad en este plano, por lo que se necesitan ciertos parámetros adicionales para facilitar la resolución

Después de establecer los parámetros apropiados, es necesario construir un sistema que permita calcular los valores angulares de las articulaciones en función del punto donde se encuentre el extremo y de los parámetros del brazo. Para lograr esto, se debe comenzar resolviendo las expresiones para r y q1 en función de la ecuación dada

$$r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \tag{1}$$

$$q_1 = arctan\left(\frac{p_x}{-p_y}\right) \quad (2)$$

Una vez que se ha calculado el valor de r, se puede utilizar el teorema del coseno para β y γ para resolver los demás parámetros, tal y como se muestra en la ecuación

$$s = \sqrt{(r - l_1)^2 + (p_z - h_1)^2} \quad (3)$$
$$\alpha = arctan\left(\frac{p_z - h_1}{r - l_1}\right) \quad (4)$$
$$\beta = arccos\left(\frac{s^2 + l_2^2 - l_3^2}{2sl_2}\right) \quad (5)$$
$$\gamma = arccos\left(\frac{l_2^2 + l_3^2 - s^2}{2l_2l_3}\right) \quad (6)$$
$$q_2 = \alpha - \beta \quad (7)$$
$$q_3 = \gamma - \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

De esta manera, se puede obtener una expresión que indica los ángulos necesarios que deben tomar las articulaciones del brazo para posicionar el extremo en el punto deseado. Es importante destacar que este cálculo es válido solo para las tres patas del lado izquierdo del robot, ya que las patas del lado derecho tienen un sistema de referencia con el eje Z en sentido opuesto, lo que implica que un mismo punto en este eje tendría un valor positivo para una pata del lado izquierdo y negativo para una del lado derecho. Por lo tanto, los ángulos de las articulaciones del lado derecho deben ser determinados utilizando las ecuaciones:

$$r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (9)$$
$$q_1 = actan\left(\frac{p_x}{-p_y}\right) \quad (10)$$
$$s = \sqrt{(r - l_1)^2 + (p_z - h_1)^2} \quad (11)$$
$$\alpha = arctan\left(\frac{-p_z - h_1}{r - l_1}\right) \quad (12)$$
$$\beta = arccos\left(\frac{s^2 + l_2^2 - l_3^2}{2sl_2}\right) \quad (13)$$
$$\gamma = arccos\left(\frac{l_2^2 + l_3^2 - s^2}{2l_2l_3}\right) \quad (14)$$
$$q_2 = \alpha - \beta \quad (15)$$
$$q_3 = \gamma - \frac{\pi}{2} \quad (16)$$

- Selección de componentes: Se deben seleccionar los componentes necesarios para construir el robot, lo que incluye los motores, los servomotores, los sensores, la electrónica, la batería y otros materiales necesarios para la construcción.
- Construcción del robot: Se debe ensamblar el robot hexápodo siguiendo el diseño mecánico y utilizando los componentes seleccionados.
- Programación: Se debe programar el robot para que realice las tareas específicas definidas en la fase de requerimientos. Se pueden utilizar lenguajes de programación como Python, C++, JavaScript o Arduino.
- Pruebas y ajustes: Se deben realizar pruebas para verificar que el robot hexápodo funciona correctamente y cumple con los requerimientos establecidos. Se pueden realizar ajustes y mejoras en caso de ser necesario.
- Implementación: Finalmente, se debe implementar el robot hexápodo en el entorno en el que se va a utilizar y monitorear su desempeño.

La metodología para la elaboración de un robot hexápodo implica definir los requerimientos, diseñar la estructura mecánica, seleccionar los componentes, construir el robot, programarlo, realizar pruebas y ajustes, y finalmente implementarlo [3].

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 10, pp. 123 – 135
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

3. Desarrollo del robot hexápodo

Como consiguiente, se consideraron los siguientes requerimientos para la elaboración del robot:

3.1 Requisitos de hardware y software

3.1.1 Requisitos de hardware:

- Estructura y mecanismos de movimiento: La estructura del robot debe ser resistente y estar diseñada para soportar cargas y movimientos repetitivos, es por ello que se contemplará la utilización de Solera para la estructura del robot. Además, debe contar con mecanismos de movimiento que permitan al robot moverse en diferentes direcciones y terrenos irregulares. Dicho mecanismo deberá estar conformado por 6 patas, las cuales deben constar de 3 GDL en cada una de estas, un servomotor por DGL (figura 4).

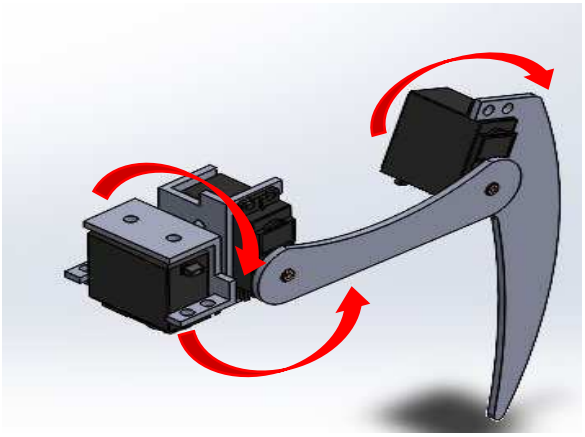


Figura 4. Grados de movilidad con los que cuenta una pata.

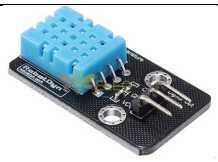
- Servomotores: El robot hexápodo debe contar con servomotores que permitan el movimiento de las patas y de otros componentes del robot, como cámaras y sensores. Se pretende usar el servomotor MG995 (figura 5) gracias a su alto torque y a su bajo consumo de corriente, lo que lo hace atractivo para este proyecto (tabla 1).

Tabla 1. Especificaciones servomotor.

Ilustración	Especificaciones
Figura 5. MG995	• Peso de 55.2 g • Voltaje de operación de 4.8 a 6V • Velocidad de operación a 4.8V es de 0.17 Seg/60° • Soporta hasta 15Kg-cm con 6 V (Se recomienda 12KG Máximo) • Dimensión 40x20x36.5mm • Rango de temperatura -30 A 60°c

- Sensores: Los sensores son elementos clave para la navegación y exploración del robot (tabla 2). Deben incluir sensores de distancia para el cual se consideró el sensor Ultrasónico ARD-350 (figura 6), de temperatura y de humedad el cual se consideró el módulo DHT11 (figura 7), y de luces el cual se considerará el módulo LDR (figura 8) que permitirá indicar la cantidad de luz disponible en el entorno que se esté explorando.

Tabla 2. Especificaciones sensores.

Ilustración	Especificaciones
Figura 6. Ultrasónico ARD-350	• Rango de detección 1,7 a 400 cm • Frecuencia 40 kHz • Pulso de 10useg • Angulo de apertura 15° • Alimentación: 5 V
 **Figura 7. DHT11**	• Alimentación: 3.3-5V • Corriente: 2,5 mA • Humedad: 20 – 90% ± 5% • Temperatura: 0 – 50º ± 2% • Tasa de muestreo: ≤ 1 Hz
Figura 8. LDR	• Resistencia en la luz: ~200 Ohm. • Resistencia en la oscuridad: ~15k Ohm. • Máxima tensión: 150Vdc. • Consumo máximo: 100mW • Frecuencia de luz pico: 540 nm

- Cámara: Una cámara es necesaria para capturar imágenes y videos del entorno y transmitirlos a través de una conexión inalámbrica a un operador humano. Vea la tabla 3 y la figura 9.

Tabla 3. Especificaciones cámara.

Ilustración	Especificaciones
Figura 9. Cámara	• Lente: lente HD • Frecuencia de imagen: 30FPS • Formato de foto: BMP JPG • Resolución: 1920 * 1080 P • Formato de salida: M-JPEG • Tipo de interfaz: USB2.0 • Control de parpadeo: 50Hz • Micrófono: Micrófono incorporado • Rango de enfoque: 20mm • Tamaño: 70mm * 50.7mm * 44mm • Resolución de image: 1.3 Mpx

- Fuente de alimentación: El robot debe contar con una batería o fuente de alimentación que le permita funcionar durante largos períodos de tiempo sin interrupción, en este caso se utilizan

pilas de 3.7v a 9,900mAh las cuales se conectaran en serie y paralelo para obtener una capacidad de 12v 19,700Mah. Vea la tabla 4 y la figura 10.

Tabla 4. Especificaciones de fuente de alimentación.

Ilustración	Especificaciones
Figura 10. Batería	• Tamaño: 19 mm x 65 mm • Sin efecto memoria • Tipo de batería: Batería recargable 18650 • Voltaje: 3.7V-4.2v • Capacidad: 9900mAh • Material: batería Li-ion

3.1.2 Requisitos de software:

- Control del movimiento: El software debe incluir un control de movimiento que permita controlar de manera precisa los servomotores, y que permita al robot moverse en diferentes direcciones y terrenos irregulares.

- Procesamiento de datos: El software debe ser capaz de procesar los datos recopilados por los sensores y la cámara, y de tomar decisiones en tiempo real en función de la información recopilada.

- Interfaz de usuario: El software debe contar con una interfaz de usuario que permita a un operador humano controlar el robot y recibir información sobre su entorno.

- Comunicación: El software debe contar con capacidades de comunicación inalámbrica para enviar y recibir datos desde un operador humano o una estación base.

4. Resultados

4.1 *Diseño mecánico.*

Para llevar a cabo el desarrollo del presente proyecto, el equipo ha trabajo en un diseño realizado en SolidWorks 2020 que está conformado en 2 partes; diseño de la carcasa en donde estará montado el circuito electrónico y las patas del hexápodo con los servomotores posicionados de tal manera que se tengan tres grados de libertad por pata para tener un mayor rango de movimiento.

- Diseño de carcasa (figura 11):

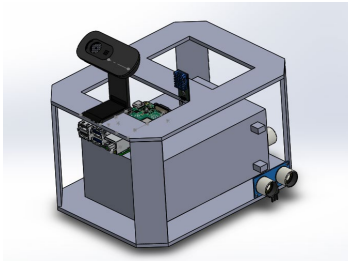


Figura 11. Vista isométrica de la carcasa del Hexápodo.

- Diseño de patas (figura 12 a figura 16):

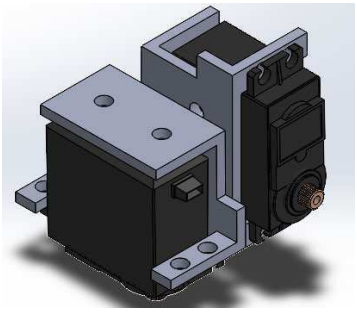


Figura 12. Vista isométrica de la articulación entre la carcasa y fémur (coxa).

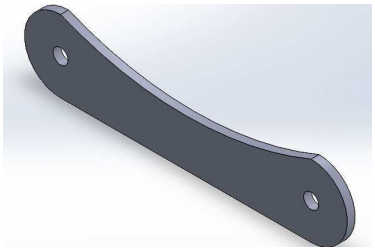


Figura 13. Vista isométrica del fémur de la pata.

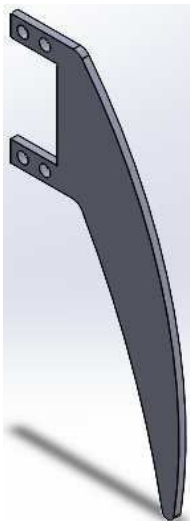


Figura 14. Vista isométrica del tarso de la pata.

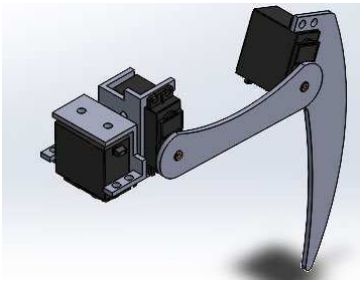


Figura 15. Vista isométrica de la pata derecha.

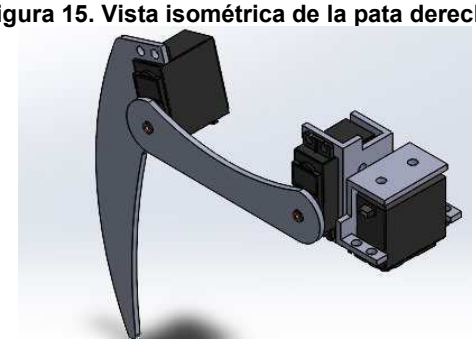


Figura 16. Vista isométrica de la pata izquierda.

- Diseño del hexápodo:

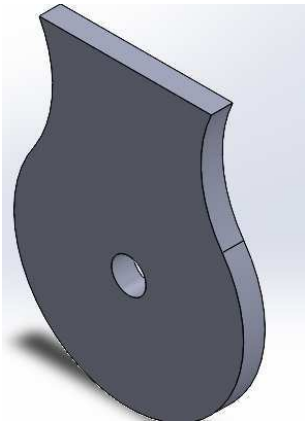


Figura 17. Vista isométrica del conector entre la carcasa y la pata.

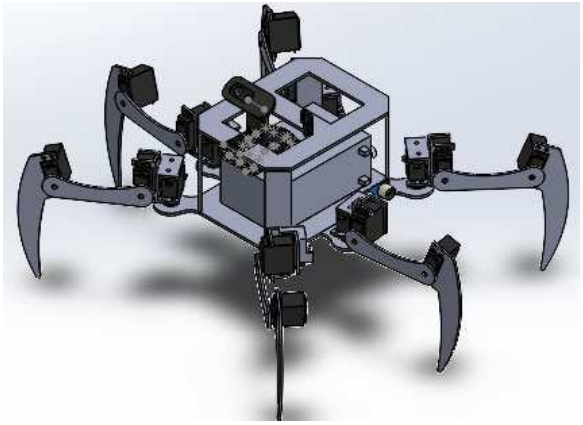


Figura 18. Vista isométrica del ensamble completo del hexápodo.

- Primera pata del robot

En la siguiente imagen se presenta el diseño físico de la primera pata del robot hexápodo, donde se observan los 3 GDL de la pata. Se ha cargado un pequeño código alternativo para esta prueba. Se realizaron los movimientos esperados de manera exitosa.

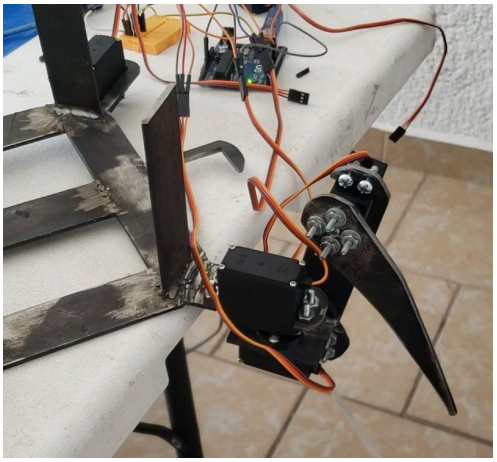


Figura 19. Ensamble y pruebas de la primera pata del robot.

Figura 20. Ensamble y pruebas de la primera pata del robot.

Figura 21. Ensamble y pruebas de la primera pata del robot.

4.2 Diseño electrónico.

El diseño electrónico se llevó a cabo en Proteus v8.13 tomando en cuenta cada uno de los dispositivos de consumo.

En primer lugar, se considera que el microprocesador a utilizar no tiene entradas analógicas, por lo cual se utilizará un Arduino Mini como ADC.

En el diseño podemos apreciar 18 servomotores mg995, 3 sensores ultrasónicos, 1 modulo ldr, 1 modulo dht11, la cámara web, el microprocesador Broadcom y el Arduino.

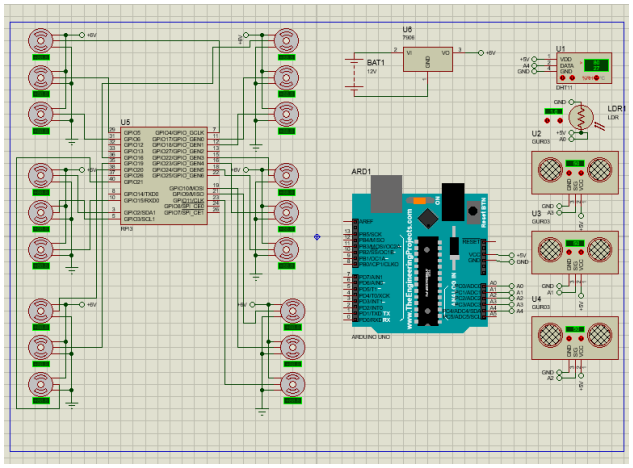


Figura 22. Diseño electrónico elaborado en Proteus 8.

4.3 Programación y primeras pruebas físicas

La programación se elaboró utilizando Node.js v18.14.2 un entorno de ejecución para el lenguaje de programación JavaScript. Con esta programación se pudieron realizar pruebas con los servomotores y la conexión de la interface del programa con el cual se va a conectar el robot. La conexión de la aplicación con el microprocesador se realizó vía wifi corriendo el sistema operativo Debian v11. Dicha interface fue diseñada en HTML 5 y programada también en JavaScript. Se puede apreciar en la figura 23 que ya se logró establecer la conexión entre la cámara web y la aplicación.

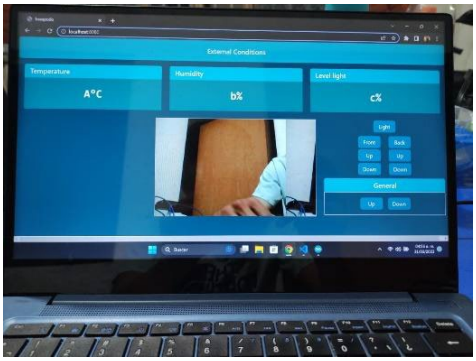


Figura 23. Interface de la aplicación que controlará el robot hexápodo.

En la figura 20 podemos apreciar del lado izquierdo los grados de giro de la cámara web tanto en X como en Y. Este movimiento se controlará con el mouse de la computadora. En la figura 21 podemos apreciar en la esquina inferior izquierda las teclas que se utilizaran para hacer caminar el robot.

Las teclas están configuradas de la siguiente manera:

- W: adelante.
- S: atrás.

- A: izquierda.
- D: derecha.

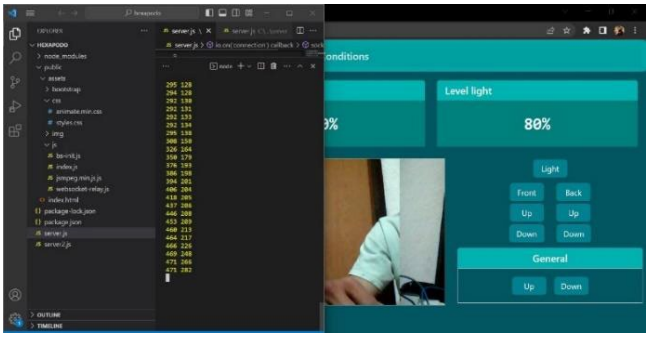


Figura 24. Interface de la aplicación y los ángulos de giro de la cámara web en los ejes X y Y.

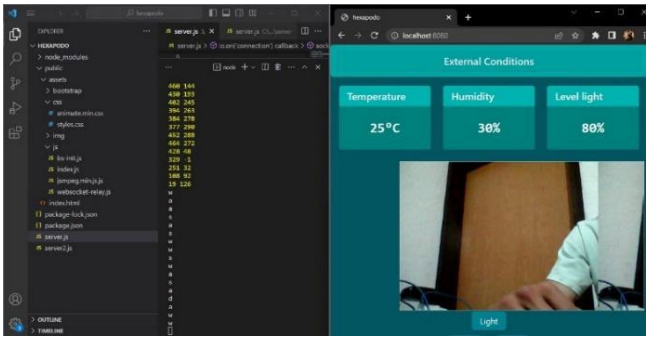


Figura 25. Interface de la aplicación, ángulos de giro de la cámara web en los ejes X, Y y las letras del teclado que realizarán los movimientos de desplazamiento del robot.

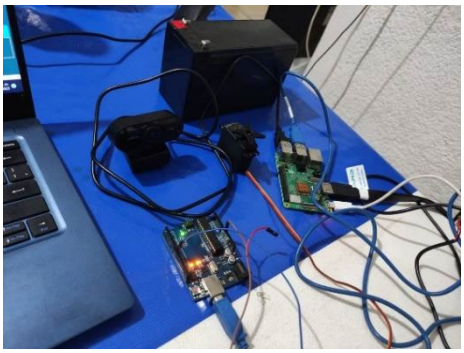


Figura 26. Microprocesador Broadcom, Arduino, cámara web y servomotor mg995 utilizados para las primeras pruebas.

5. Análisis de costos

Para un análisis de costos-beneficios se utilizó un robot comercial “Kit De Robot Freenove Big Hexapod Para Raspberry -negro” como comparación, este kit tiene un precio en el mercado de $5,220 atizando como referencia Mercado Libre, esto incluye código del hexápodo, estructura y un, sin embargo no incluye partes fundamentales como lo son Raspberry pi, cámara, batería, servomotores y sensor de distancia los cuales son fundamentales para el funcionamiento y que implican un costo extra del ya mencionado, las medidas que representa son 45x38x10 cm y su capacidad de carga es de 1.5 kg.

El mismo tiene diferentes funciones como detector de obstáculos, suspensión, transmisión de video en tiempo real, y pitidos de estatus, controlado a través de wifi mediante una aplicación multiplataforma, el distribuidor no da a conocer más especificaciones aparte de las ya mencionadas [7].

En comparación a el robot desarrollado este tiene un costo de producción $4,000 considerando los componentes indispensables microprocesador, servomotores, batería, estructura, tornillería, cámara, sensores, electrónica, el mismo tiene unas medidas de 45x42x33 cm con una capacidad de carga de 8 kg, tiene funciones similares, pero incluye sensor de luz, humedad, temperatura y distancia, lo que lo hace perfecto para obtener los datos de su entorno.

6. Conclusiones

La elaboración de un robot hexápodo para búsqueda y rescate es un proyecto ambicioso y desafiante que requiere una planificación cuidadosa y una ejecución meticulosa. A partir del diseño 3D y la elección de los materiales adecuados, pasando por la selección de componentes y conexiones electrónicas, hasta la programación del control multiplataforma, cada etapa del proceso es crítica para lograr un robot funcional y eficiente.

Aunque se han enfrentado dificultades en el proceso, como la selección de los componentes adecuados y la programación del control multiplataforma, el equipo ha logrado superar estos obstáculos y obtener resultados positivos en la creación del robot hexápodo para búsqueda y rescate. Con servomotores de alto torque, una batería de alto amperaje y una cámara y sensores adecuados, el robot puede soportar cargas considerables y operar durante largos períodos de tiempo.

En general, la creación de un robot hexápodo para búsqueda y rescate es un proyecto complejo que requiere una combinación de habilidades técnicas y creativas, y que puede presentar desafíos significativos en el camino. Sin embargo, si se lleva a cabo de manera cuidadosa y metódica, el resultado puede ser un robot altamente efectivo y útil para una variedad de aplicaciones.

Referencias

[1] Robótica: qué es, origen, usos, ventajas. . . (2021, 7 junio). Ferrovial. Recuperado 12 de marzo de 2023, de https://www.ferrovial.com/es/innovacion/tecnologias/robotica/

[2] E. (2020, 3 enero). ROBOTS INDUSTRIALES PARA ENTORNOS PELIGROSOS. Eurobots. Recuperado 12 de marzo de 2023, de https://www.eurobots.com.pe/news/robots-industriales-para-entornos-peligrosos/

[3] Ulloa, L. (2017). Diseño e implementación de un robot hexápodo controlado inalámbricamente mediante Arduino y Android equipado con un director electro óptico [Proyecto de graduación, Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil]. https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14194/1/UPS-GT001884.pdf

[4] Cantor, J. (2015). DISEÑO Y SIMULACION DE UN ROBOT HEXAPODO DE UNA SOLA JUNTURA POR PIERNA [Trabajo de grado, UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA]. https://docplayer.es/18907975-Diseno-y-simulacion-de-un-robot-hexapodo-de-una-sola-juntura-por-pierna.html

[5] Robot hexápodo. (2019). Colabora. Recuperado 19 de marzo de 2023, de https://colaboraeducacion30.juntadeandalucia.es/educacion/colabora/web/202923gt964/inicio/-/blogs/robot-hexapodo?_33_redirect=https://colaboraeducacion30.juntadeandalucia.es/educacion/colabora/web/202923gt964/inicio?p_p_id=33&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=1

[6] Palarea, G., & Figueroa, R. (s. f.). Desarrollo de un Robot Hexapodo-UVG MT3005. Hackaday.io. Recuperado 19 de marzo de 2023, de https://hackaday.io/project/177750/logs?sort=oldest

[7] Kit De Robot Freenove Big Hexapod Para Raspberry -negro. (s. f.-b). Envío gratis. https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-941957584-kit-de-robot-freenove-big-hexapod-para-raspberry-negro-_JM?matt_tool=28238160&utm_source=google_shopping&utm_medium=organic

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 11, pp. 136 – 153
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Desarrollo de un sistema de medición para la velocidad del proyectil en una barra de Hopkinson

Zavala Villalpando José Guadalupe ✉, Sámano Ortega Víctor Manuel, Aguilera Álvarez Juan Pablo, Martínez Nolasco Juan José, Alcaraz Caracheo Luis Alejandro

Tecnológico Nacional de México / Campus Celaya.
✉jose.zv@celaya.tecnm.mx

Resumen

En este documento se describe el desarrollo de un sistema de medición de la velocidad de un percutor o proyectil en la Barra de Hopkinson; además, se muestra una ecuación polinómica, y su gráfica de la velocidad de desplazamiento del percutor en m/s en un intervalo de presión de 137.9 *a* $275.79\ KPa$ *de activación del cañón. La velocidad se evaluó con la implementación de dos sensores óptoeléctricos debido a su velocidad de conmutación, con la intención de captar los estímulos externos con mayor resolución. Estos sensores se ubicaron en la guía del cañón de disparo a una distancia constante, lo que permitió medir los tiempos de activación entre uno y otro sensor por medio de una myRIO y el software LabVIEW, evaluando de esta manera la velocidad de desplazamiento del proyectil que depende de la presión de la cámara de disparó. Adicionalmente, se muestra la relación que existe entre la magnitud del pulso incidente en estado estable y la velocidad del percutor.*

Palabras clave: Barra de Hopkinson, LabVIEW, MyRIO, Sensor óptico.

1. Introducción

La Barra de Hopkinson Polimérica (ver figura 1) es una máquina utilizada para la caracterización de materiales de baja impedancia sometidos a cargas dinámicas. El sistema de barras consiste en intercalar una muestra corta entre dos barras elásticas largas, conocidas como barra incidente y barra transmitida. Por medio de un mecanismo de bazuca, un proyectil o percutor sale disparado por un tubo e impacta en la barra incidente lo que genera ondas longitudinales de esfuerzo sobre las barras (Chen & Song, 2011). Mediante unas galgas extensiométricas en configuración de puente completo de Wheatstone se generan las señales de las ondas de esfuerzo a través un par de señales de voltaje, que son capturadas por un osciloscopio para su posterior procesamiento que por medio de unos cálculos matemáticos donde se las gráficas de esfuerzo-deformación de las muestras en análisis. Las señales que se producen se conocen como pulso incidente, pulso reflejado y pulso transmitido. El problema que se aborda en este proyecto es desarrollar un sistema que permita conocer la velocidad a la que el proyectil impacta sobre la barra incidente dependiendo de la presión de aire en el interior de la cámara de disparo.

En la figura 2, se muestra el sistema montado de barra de Hopkinson para la caracterización de materiales de baja impedancia ya que la barra incidente, la barra transmitida y el percutor están manufacturadas en nailon. El mecanismo de disparo mostrado en la figura 2 funciona de la siguiente manera: una llave de paso permite el flujo del aire comprimido que llena un contenedor sellado o cámara de disparo en el que se mantiene la presión a la cual el proyectil saldrá disparado, esta presión se mide mediante un sensor de presión digital, al tener la presión deseada se activa una electroválvula que permite que el aire comprimido impulse el proyectil por un cañón e impacte la barra.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 11, pp. 136 – 153
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

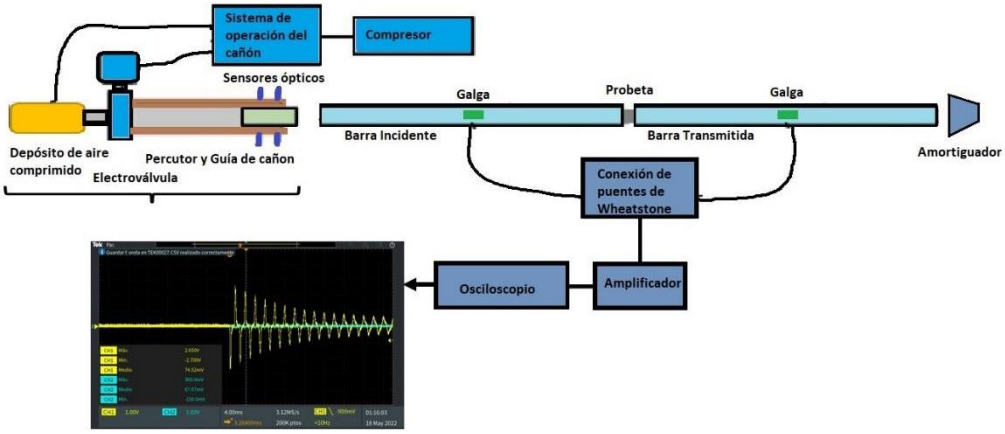


Figura 1. Sistema de Barra de Hopkinson (Kolsky).

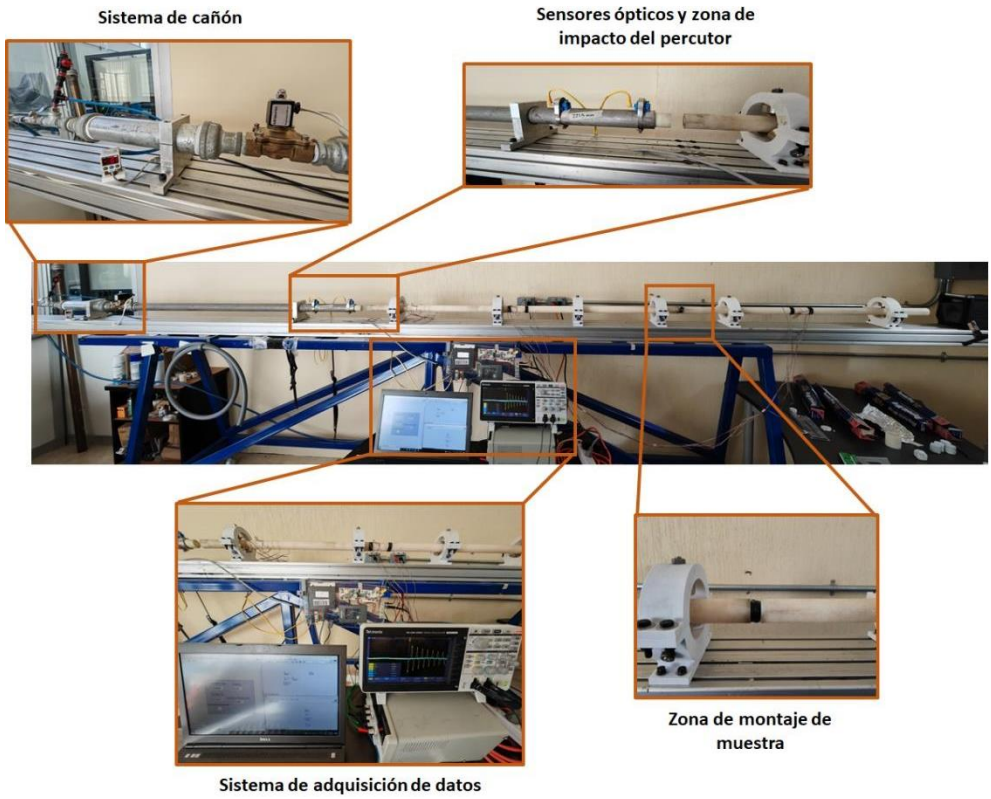


Figura 2. Sistema de Barra de Hopkinson Polimérica

La importancia de medir la velocidad con la que impacta el percutor radica en asegurar la repetitividad de las pruebas, pues la velocidad del percutor determina la magnitud del pulso incidente (Gallina et al., 2003). Se utilizaron sensores ópticos reflectivos a una distancia constante de $220\ mm$ para determinar la velocidad del proyectil de nylon al final del recorrido en la bazuca. La velocidad se calcula utilizando la relación de la distancia a la que se ubican los sensores y el tiempo que se tiene entre la activación de los dos sensores utilizados. El tiempo se obtiene de la diferencia de los tiempos de activación entre los sensores ópticos.

Los sensores ópticos reflectivos, son dispositivos eléctricos cuya emisión y recepción de un haz de luz están yuxtapuestos en el mismo conjunto óptico. Un haz emitido por el transmisor se refleja en la

superficie del objeto a detectar y lo devuelve al receptor. Este tipo de sensores son muy utilizados en la industria, así como en la robótica ya que son eficientes para detectar casi todo tipo de objetos, cuando se interrumpe el haz de luz con un objeto el receptor detecta la intensidad de luz reducida y activa el sensor (Corona Ramirez et al., 2016). Los sensores utilizados son marca SICK modelo GTB6-P4211, que cuentan con un tiempo de respuesta menor a $625\ \mu s$.

Para la adquisición y procesamiento de datos se utilizó un dispositivo embebido desarrollado por National Instruments y programable por el software LabVIEW, conocido como myRIO.

El proceso en este documento abarca desde la comprobación de funcionamiento del sensor, hasta la obtención de las ecuaciones y gráficas que relacionan la presión del aire dentro del contenedor del cañón y la velocidad que alcanza el percutor antes del impacto.

2. Metodología

El desarrollo del proyecto se dividió en 5 etapas (ver figura 3), la primera de ellas consiste en la caracterización de los sensores para estimar su tiempo de respuesta real. En la segunda etapa se presenta el modelado y fabricación de los soportes donde fueron montados los sensores al cañón del sistema de disparo del percutor. Ahora bien, la tercera etapa consistió en implementar programas tanto en la myRio de National Instruments donde se obtiene la velocidad con la que impacta el percutor sobre la barra incidente y en la PC para visualizar los resultados e identificar la presión requerida para determinada velocidad de impacto deseada. Para la cuarta etapa se realizó la validación de resultados. Finalmente, la quinta etapa consistió en generar un modelo con el que se pueda establecer la velocidad de impacto del percutor y este arroje la presión con la que se debe activar el cañón.

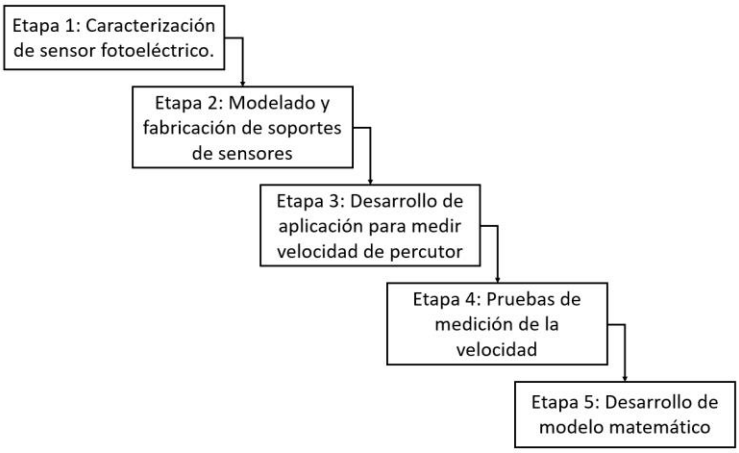


Figura 3. Diagrama de flujo de metodología para la caracterización y medición de la velocidad del percutor en una barra de Hopkinson

2.1 Caracterización del sensor fotoeléctrico

Para la comprobación del funcionamiento del sensor bastó con realizar la medición de la velocidad de un motor a través del desarrollo de un encoder incremental (Corona Ramirez et al., 2016). Además, se midió el tiempo de subida y bajada de la señal de conmutación del sensor con la finalidad de conocer su eficacia para medir la velocidad del proyectil en la Barra de Hopkinson. La medición de la velocidad del motor consistió en implementar un contador de pulsos en un intervalo de tiempo para posteriormente cambiarlo a revoluciones por minuto (RPM), por lo que físicamente se montó un disco de $210\ mm$ de diámetro con cuatro orificios de $8\ mm$ de diámetro distribuidos equitativamente en un radio de $95\ mm$ por donde pasa el haz de luz del sensor; en la figura 4, se muestra la implementación física para medir la velocidad del motor.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 11, pp. 136 – 153
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

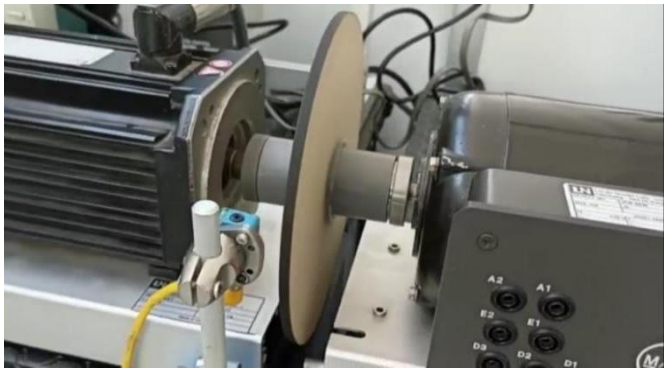


Figura 4. Montaje de sensor y disco para medir la velocidad de servomotor.

La implementación de instrumentación para medir la velocidad del motor se muestra en la figura 5. La instrumentación consta de un Arduino UNO donde se cuentan los pulsos en un determinado tiempo, el acondicionamiento de la señal entre el sensor y el Arduino se utilizó un optoacoplador PC817C con una frecuencia de conmutación de 80 kHz. La finalidad del optoacoplador en la implementación fue reducir la tensión de los pulsos de la señal de activación del sensor a 3.3 V, pues la señal de conmutación del sensor es a 24 V. El programa de Arduino consistió en un ciclo en el que cada segundo los pulsos totales detectados por la interrupción “rising” se multiplicaron por 15 como se muestra en la ecuación (1) (Anuchin et al., 2018); además, se implementó una condición para mostrar el resultado en la pantalla de una computadora. La comprobación de los resultados se hizo a la par pues el equipo utilizado fue un banco de pruebas de servomotor de Llucas Nülle que cuenta con su propio medidor de velocidad.

$$n_{motor} = \left(\frac{X\ pulsos}{1\ s}\right)\left(\frac{1\ revolución}{4\ pulsos}\right)\left(\frac{60\ s}{1\ min}\right) = X * 15\ (RPM) \quad (1)$$

Donde X es el número de pulsos contados en un segundo en el Arduino.

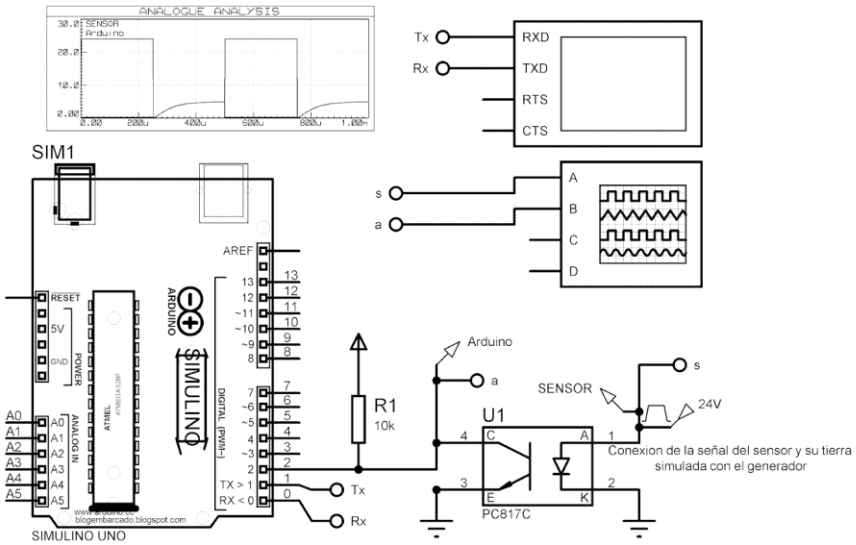


Figura 5. Esquema de conexión de instrumentación.

Para verificar el correcto funcionamiento del medidor de velocidad del equipo de Llucas Nüllle se utilizó un tacómetro de contacto y se verificó que las lecturas concordaran donde el error de la medición rondo el 0.12%. En la figura 6, se muestra un ejemplo de las lecturas de verificación de la velocidad del motor.

a) b)

Figura 6. Verificación de la lectura de velocidad de motor de prueba, a) con tacómetro y b) lectura de equipo Llucas Nülle.

Para verificar el tiempo de recuperación y la frecuencia a la cual estaba trabajando el sensor, se utilizó un osciloscopio con el fin de obtener datos de la activación del sensor y graficarlos en MATLAB. Se observó el tiempo que tarda en realizar la transición a alto es de $4.8\ \mu s$ y la transición a bajo de $216.8\ \mu s$ como se muestra en la figura 7. Además, el fabricante del sensor indica que su tiempo de respuesta es menor a $625\ \mu s$ (GTB6-P4211 | Fotocélulas | SICK, s. f.), lo que se debe a los colores que esté sensando y la iluminación del espacio.

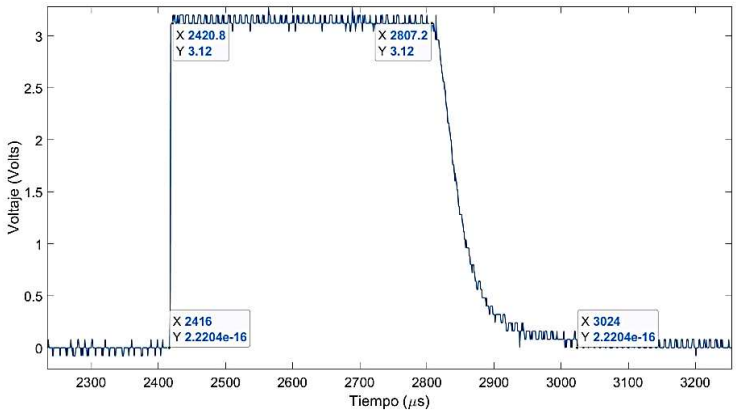


Figura 7. Gráfica de pulso del sensor SICK modelo GTB6-P4211 a una frecuencia de $26.62\ Hz$

Con el tiempo de subida evaluado en el sensor optoeléctrico, se determinó que es viable utilizar dos sensores a colocados a una distancia fija uno del otro para medir la velocidad de un percutor en una Barra de Hopkinson.

2.2 Modelado y fabricación de soportes para sensores

La guía del cañón de la Barra de Hopkinson donde se implementó el medidor de velocidad es un tubo de acero inoxidable de $38.1\ mm$ de diámetro interior cédula 80; por lo que se implementaron dos perforaciones de $8.33\ mm$ al extremo del tubo de salida del percutor, la primera perforación a $270\ mm$ y la segunda perforación a $50\ mm$; lo que equivale a una distancia de $220\ mm$ entre los sensores.

Antes de generar los modelos de fijación de los sensores ópticos se decidió que serían fabricados por impresión 3D con material PLA. En la figura 8, se muestra el ensamble de los modelos para montar

el sensor optoeléctrico donde se consideraron las dimensiones del sensor y el diámetro exterior del tubo guía del cañón de la Barra de Hopkinson. El ensamble consta de cuatro partes, donde la primera es una caja que encierra al sensor de cualquier luz del exterior que pueda interferir en su proceso de emisión y las 3 piezas restantes forman una abrazadera para la fijación del sensor en el tubo.

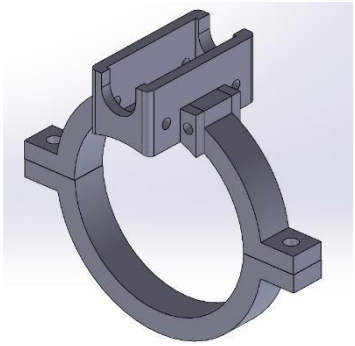


Figura 8. Ensamble de elementos de sujeción de sensor optoeléctrico en guía de cañón de Barra de Hopkinson.

En la figura 9, se muestra como quedaron los sensores montados en la guía del cañón. Para la calibración de la distancia de activación entre los dos sensores se introdujo el percutor y se desplazó hasta activar cada uno de los sensores. En las posiciones de activación de los sensores se midió la distancia hasta el extremo libre del tubo y se obtuvo una diferencia de $221.5\ mm$.

Figura 9. Montaje de sensores optoeléctricos en guía de cañón de Barra de Hopkinson

2.3 Desarrollo de aplicación para la velocidad del percutor en la barra de Hopkinson.

En seguida de realizar la instalación de los sensores, se procedió con la programación para el procesamiento de la información obtenida por las activaciones de los sensores. La programación se desarrolló en el entorno de LabVIEW y para la lectura y procesamiento de datos se utilizó una FPGA NI myRIO. En la figura 10, se muestra la lógica de programación desarrollada en LabVIEW. Consta de la habilitación de dos entradas digitales de la myRIO, dos variables (registros de corrimiento) que cada una almacena el tiempo en el que se activan los sensores respectivamente (S_1 y S_2).

La variable t es el delta de tiempo obtenido de la diferencia de las cuentas de los “ticks” en el que se activaron los sensores y dividido entre $40 * 10^6$ porque la frecuencia de trabajo de la myRIO es de $40\ MHz$. Además, d es una distancia constate de $221.5\ mm$ $(0.2215\ m)$ a la que se colocaron los sensores y finalmente la variable de velocidad que se obtiene de dividir las variables d/t. Para los tiempos se implementaron bloques “tick count” que mide los ticks del reloj de la myRIO desde que comienza la ejecución. Un “tick” es el incremento mínimo del reloj interno de la FPGA en la myRIO que equivale a $25\ ns$, al evaluar el tiempo que tarda en ejecutarse un ciclo de la secuencia se evaluó en 69 “ticks” lo que equivale a $1.725\ \mu s$ por ciclo.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 11, pp. 136 – 153
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

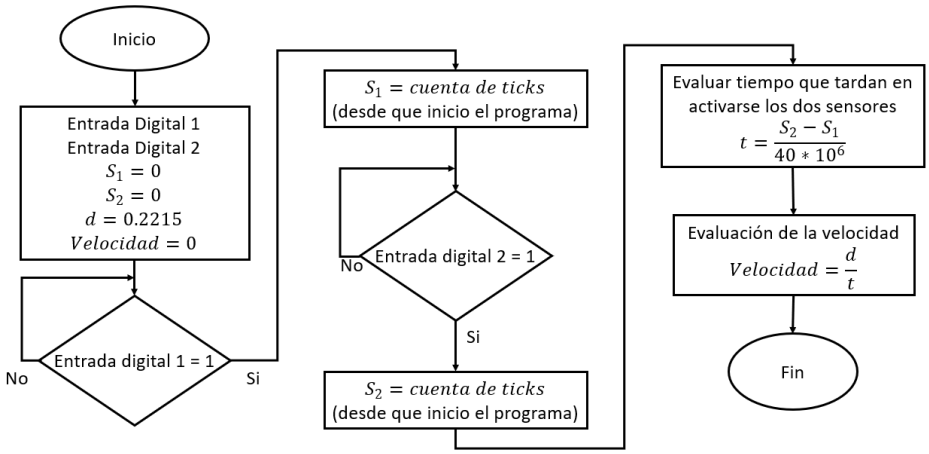


Figura 10. Diagrama de flujo para evaluar velocidad del percutor en el cañón de la Barra de Hopkinson

En la figura 11, se muestra la interfaz gráfica donde se presenta la diferencia de tiempo en segundos que tardan en activarse los dos sensores optoeléctricos, además, se presenta el resultado de la evaluación de la velocidad en metros por segundo que lleva el percutor al impactar en la barra incidente. Adicionalmente, se cuenta con una sección donde el usuario escribe la velocidad deseada del percutor em metros por segundo y la aplicación determina la presión en lbf/in^2 o KPa a la que se debe calibrar el depósito del cañón antes de realizar el disparo del percutor.

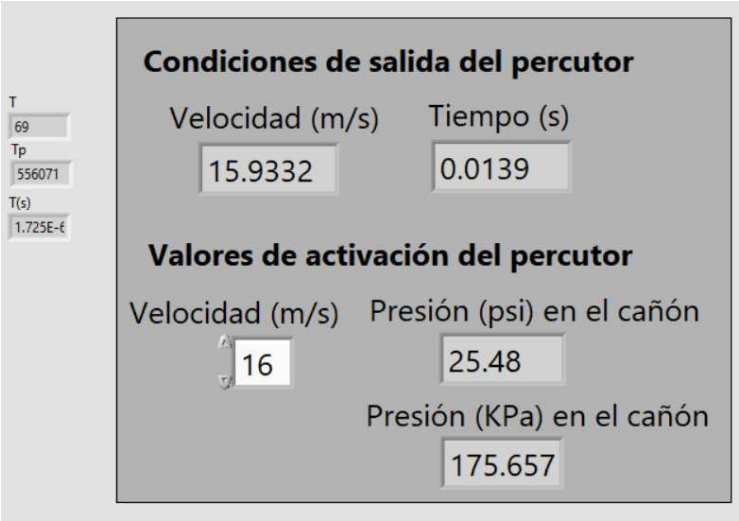


Figura 11. Interfaz gráfica del programa de evaluación de la velocidad del percutor.

2.4 Pruebas de medición de la velocidad del percutor.

Después de tener el programa de LabVIEW cargado en la myRIO, se procedió con las pruebas a diferentes presiones en el depósito del cañón en un rango de 137.9 a $275.79\ KPa$ $(20$ a $40\ lbf/in^2)$ incrementando la presión en $34.47\ KPa$ y repitiendo la prueba 3 veces. Cada prueba consistió en impactar únicamente el percutor sobre la barra incidente, a lo que se le conoce como prueba en vacío. De dichas pruebas se captura el tiempo que tardan en estar activados los dos sensores optoeléctricos y la velocidad evaluada por la aplicación de LabVIEW. Además, se registra el pulso incidente que se

genera en la barra incidente, pues existe una relación directa entre la amplitud del pulso y la velocidad del percutor.

Para comprobar que el tiempo de activación entre uno y otro sensor mostrado en la interfaz de LabVIEW es correcto y no exista pérdida de información, se utilizó un osciloscopio para medir los tiempos de activación entre los sensores. Las señales capturadas por el osciloscopio son tomadas de las entradas a la myRIO que corresponden a cada sensor a una frecuencia de muestreo de 6.25 MHz. El tiempo de activación de los dos sensores se obtiene de la diferencia de los tiempos en que se activó cada sensor. La estimación de los tiempos de activación de los sensores se obtuvo de las señales capturadas por el osciloscopio a través del desarrollo de una aplicación en Matlab donde se registra el tiempo en el que la señal es superior a 2 volts. En la figura 12, se muestra una sección de las señales registradas por el osciloscopio para la tercera prueba con una presión de $206.84\ KPa$ $(30\ lbf/in^2)$ y se etiquetan los tiempos en los cuales las señales tienen el primer valor de voltaje superior a 2 volts. La diferencia de los tiempos de activación de los sensores corresponde a $18.01088\ \mu s$ y la lectura del tiempo registrado por la aplicación de LabVIEW es de $11.99\ \mu s$, si consideramos la lectura del osciloscopio como real el error que se tiene con la lectura de la aplicación es de 0.24%.

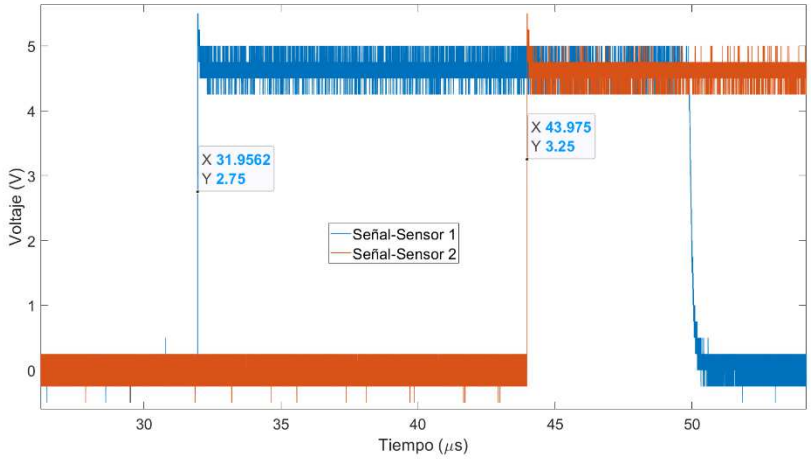


Figura 12. Registro de osciloscopio de señales de activación de los sensores optoeléctricos.

En la Tabla 1, se muestran los resultados de velocidad y tiempo capturados por la aplicación de LabVIEW en cada prueba, además del tiempo evaluado por las señales registradas por el osciloscopio. Es de destacar que el error de la medición del tiempo se evalúa tomando como referencia el tiempo medido con el osciloscopio, donde el error máximo corresponde a 0.2396% y el error promedio de todas las lecturas corresponde a 0.0276%, lo que indica que la aplicación funciona correctamente. Adicionalmente, la diferencia de tiempo más grande en las pruebas a la misma velocidad corresponde a $0.136\ ms$.

Por otra parte, (Bagusat & Rohr, 2015; Gallina et al., 2003) establece que al momento del impacto entre el percutor y la barra incidente la carga aplicada en las secciones de contacto es la misma; lo que permite establecer la ecuación 2 para determinar el esfuerzo σ_i que se genera en la barra incidente.

$$\sigma_i = \rho_i c_i v_i \tag{2}$$

Donde los parámetros corresponden a la barra incidente, siendo ρ_i la densidad, c_i la velocidad longitudinal de la onda y v_i la velocidad de desplazamiento de la barra incidente.

Ahora bien, si se considera que la barra incidente está sometida a carga axial en su rango elástico, el esfuerzo en dicho elemento se evalúa aplicando la ley Hooke.

$$\sigma_i = E_i \varepsilon_i \tag{3}$$

Donde, $E_i = c_i^2 \rho_i$ es el módulo de elasticidad de la barra incidente y ε_i es la deformación (pulso incidente) en la barra incidente. Además, al momento del impacto la velocidad que toma la barra incidente (v_i) corresponde a la mitad de la velocidad que porta el percutor (v_{st}). Por lo tanto, con las ecuaciones 2 y 3 se logra evaluar la magnitud máxima del pulso incidente como:

$$\varepsilon_i = \frac{v_{st}}{2 * c_i} \tag{4}$$

Tabla 1. Resultados de mediciones de velocidad del percutor.

No. de prueba	Presión en cañón (Kpa)	Velocidad del percutor (m/s) LabVIEW	Tiempo en LabVIEW (ms)	Tiempo en osciloscopio (ms)	Error de la medición del tiempo
1	137.9	12.3557	17.93	17.9342	0.0234%
2		12.3455	17.94	17.9409	0.0050%
3		12.3396	17.95	17.9493	0.0039%
4	172.37	15.7101	14.1	14.1017	0.0121%
5		15.6899	14.12	14.1252	0.0368%
6		15.7766	14.04	14.0368	0.0228%
7	206.84	18.3797	12.05	12.0469	0.0257%
8		18.465	12	12.0002	0.0017%
9		18.4703	11.99	12.0188	0.2396%
10	241.32	21.1254	10.48	10.4785	0.0143%
11		21.1228	10.49	10.4904	0.0038%
12		21.1246	10.47	10.47	0.0000%
13	275.79	23.054	9.61	9.6092	0.0083%
14		23.3805	9.474	9.4734	0.0063%
15		23.3465	9.488	9.4871	0.0095%

Para medir la magnitud de la deformación en la barra incidente hecha de nailon con $1.8\ m$ de longitud y un diámetro de $38.1\ mm$, se colocó un puente completo de Wheatstone con galgas extensiométricas CEA 06-125-UN-350 de Vishay a la mitad de la barra, por donde es capturado el pulso incidente a través de la medición de la diferencia de potencial generado en el puente de Wheatstone por medio de un osciloscopio. Después, la señal de voltaje se convirtió en deformación (mm/mm) con la ecuación 5 (Product Documentation - NI, n.d.).

$$\varepsilon_i(t) = \frac{2 * \frac{E_0}{E}}{GF\left[(v+1) - \frac{E_0}{E}(v-1)\right]} \tag{5}$$

Donde:

E_0 → Diferencia de potencia generada por la deformación en el puente de Wheatstone.
E → Voltaje de alimentación al puente de Wheatstone de 5 Volts de forma ideal.
GF → Factor de galga, que para las que se implementaron es de 2.125.
v → módulo de Poisson, que para el Nailon es de 0.402

Sin embargo, no es posible utilizar el pulso medido a la mitad de la barra porque la señal sufre de atenuación y dispersión de la onda debido a que el nailon es un material viscoelástico. Por ende, la corrección de los pulsos se realiza mediante la evaluación de coeficiente de propagación $\gamma(w)$ utilizando la metodología de (Bacon, 1998) lo que permite tener el pulso incidente en el extremo de contacto entre la barra incidente y el percutor (ver 13). La atenuación corresponde a una disminución de la magnitud del pulso a medida que se propaga a lo largo de la barra y la dispersión de la onda genera que las diferentes frecuencias de la onda viajen a diferente velocidad lo que ocasiona que el pulso se alargue o deforme.

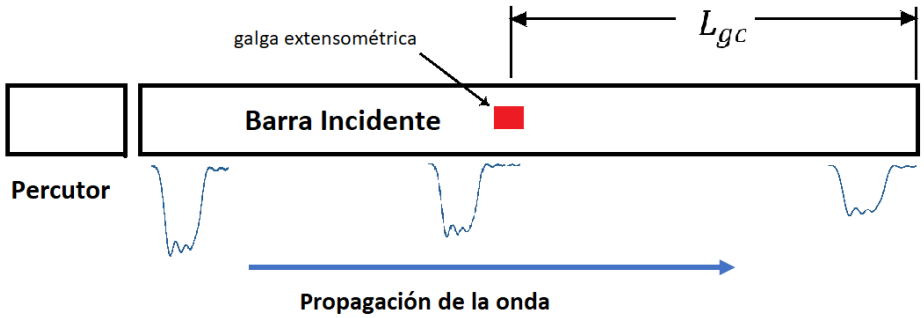


Figura 13. Propagación de la onda longitudinal en la onda incidente en la barra incidente.

El coeficiente de propagación $\gamma(w)$ está compuesto por el coeficiente de atenuación, $\alpha(w)$, que corresponde a la parte real y el número de onda, $k(w)$, que corresponde a la parte imaginaria.

$$\gamma(w) = \alpha(w) + ik(w) \tag{5}$$

Donde el número de onda está definido por $k(w) = w/c(w)$, y $c(w)$ es la velocidad de fase.

La determinación experimental del coeficiente de propagación $\gamma(w)$ consiste en realizar la medición de los pulsos incidente y reflejado a la mitad de la barra incidente, a partir de una prueba en vacío, considerando este punto central como $x = 0$ y el extremo libre de la barra como $x = l$ (ver 14). Por tanto, se mide por separado en $x = 0$ la deformación generada por el pulso incidente $\varepsilon_1(t) = \varepsilon_i$ y la deformación del pulso reflejado $\varepsilon_2(t) = \varepsilon_r$ para después desplazar las señales a $x = l$. El pulso incidente (ε_i) corresponde a el primer pulso generado por la onda producida al momento del impacto de la barra sobre el percutor y el pulso reflejado (ε_r) corresponde al segundo pulso, considerando que para un sistema de Barras de Hopkinson para pruebas de compresión con el pulso incidente la barra está a compresión y con el pulso reflejado la barra está a tensión.

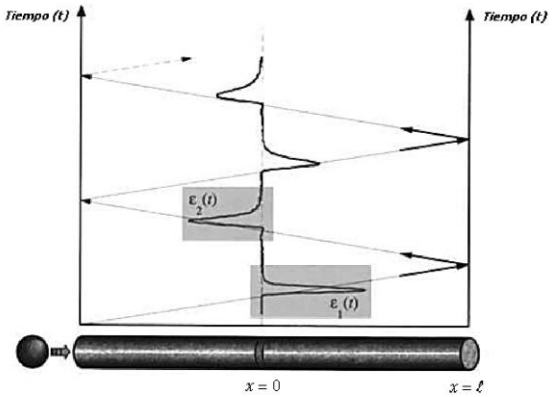


Figura 14. Trayectoria del pulso generado por un impacto en una barra finita (Bacon, 1998).

Las ecuaciones que permiten evaluar el coeficiente de atenuación $\alpha(w)$ y el número de onda $k(w)$, en $x = 0$ quedan expresadas como:

$$\alpha(w) = \frac{-ln\left(\frac{abs(\tilde{\varepsilon}_2)}{abs(\tilde{\varepsilon}_1)}\right)}{-2l} \tag{6}$$

$$k(w) = \frac{\measuredangle\left(-\frac{\tilde{\varepsilon}_2}{\tilde{\varepsilon}_1}\right)}{-2l} \tag{7}$$

Donde, $\tilde{\varepsilon}_1$ y $\tilde{\varepsilon}_2$ son las Transformadas de Fourier de los pulsos incidente y reflejado, respectivamente. Ahora bien, para realizar el corrimiento de la señal se tiene que utilizar la ecuación:

$$\tilde{\varepsilon}_{CI} = \tilde{\varepsilon}_i e^{\gamma(w)*-d_1} \tag{8}$$

Donde, $\tilde{\varepsilon}_{CI}$ es el pulso incidente en función de frecuencia en el punto de contacto entre el percutor y la barra incidente, por lo que el pulso tiene que ser transformado al dominio del tiempo con la transformada Inversa de Fourier. Con la lectura del pulso incidente en el extremo $\varepsilon_{IC}(t)$ es viable comprobar la valides de la ecuación (4), para establecer la magnitud del pulso incidente en función de la velocidad del percutor (v_{st}).

En el proceso experimental se realizó la captura de las señales de las ondas incidente y transmitidas para las pruebas P1, P6, P9, P11 y P13 reportadas en la Tabla 1 y adicionalmente se realizó una prueba a $103.42\ KPa$. En las figuras 15 y 16, se muestran los pulsos incidente y transmitido, respectivamente, leídos por la instrumentación en el punto donde están registradas las galgas.

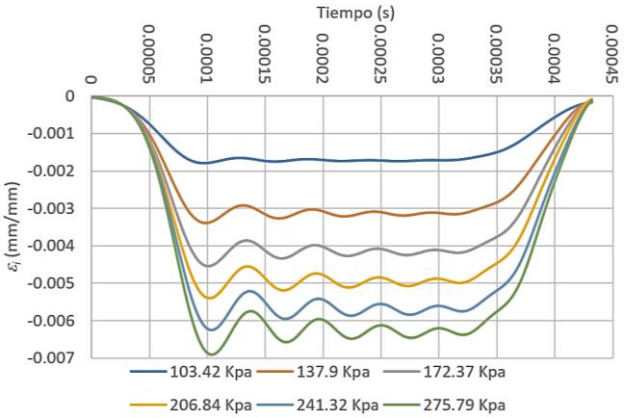


Figura 15. Pulsos incidentes ε_i leídos por la instrumentación de la Barra de Hopkinson entre presiones de 103.42 **a** $275.79\ KPa$.

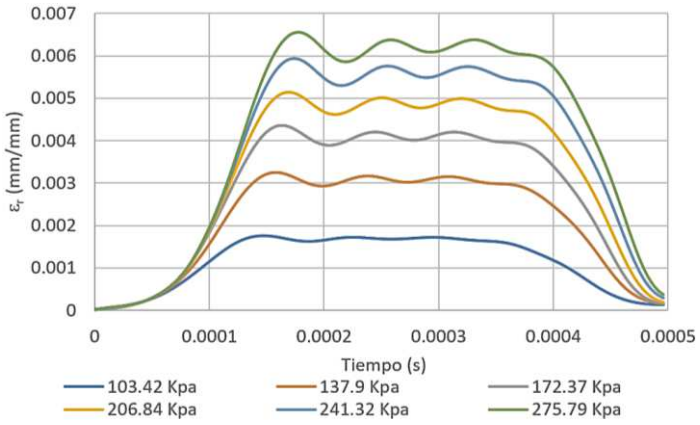


Figura 16. Pulsos reflejados ε_r leídos por la instrumentación de la Barra de Hopkinson entre presiones de 103.42 **a** $275.79\ KPa$.

Adicionalmente, en las figuras 15 y 16 se aprecia la atención de la magnitud del pulso y el alargamiento de pulso reflejado respecto al pulso incidente debido a la dispersión de la señal considerando que uno está a compresión y el otro a tensión.

Empleando las ecuaciones (6) y (7) a través de una aplicación en Matlab se generaron los coeficientes de atenuación $\gamma_i(w)$ haciendo uso de los pulsos incidente y transmitido para cada presión de trabajo. Posteriormente, utilizando los coeficientes de atenuación $\gamma_i(w)$ se realizó la corrección de los pulsos incidentes haciendo uso de la ecuación (8) y las señales se muestran en la figura 17.

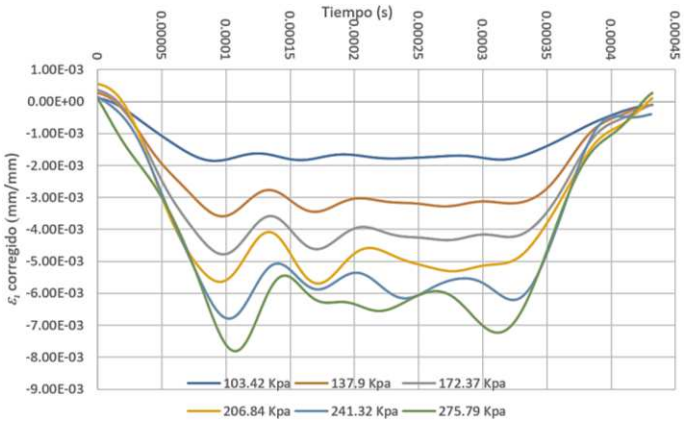


Figura 17. Pulsos incidentes corregidos al extremo de contacto entre el percutor y la barra incidente entre presiones de 103.42 **a** $275.79\ KPa$.

Ahora bien, para tener la amplitud del pulso incidente a comparar con el resultado de la ecuación 4, se procedió a sacar un promedio de la señal tomando como referencia el pico más alto en la zona de las oscilaciones como se muestra en la 18. Primeramente, se identifica el punto (P1) que es el pico más alto en la zona de amplitud más grande del pulso incidente. Enseguida, se identifican los puntos (P2) y (P3) que se encuentran en los flancos de bajada y subida del pulso, respectivamente. Después, se evalúa un valor promedio de la amplitud (PM) de todas las amplitudes comprendidas entre los puntos (P2) y (P3). El Valor de (PM) corresponde a la amplitud del pulso en un sistema ideal. En el caso para un impacto con una presión en el cañón de $172.37\ KPa$ de la prueba P6 la amplitud ideal del pulso incidente (PM) corresponde a $4190.7\ \mu\varepsilon$.

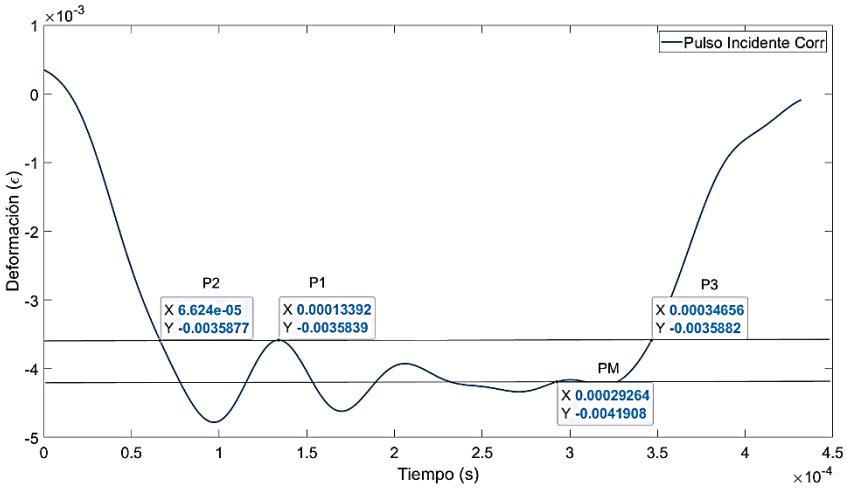


Figura 18. Representación de la amplitud de pulso incidente ideal en un impacto a $172.37\ KPa$**.**

Si se toma la prueba P6, la velocidad de impacto corresponde a $15.7766\ m/s$ y la velocidad de propagación de la onda para el nailon corresponde a $1855\ m/s$. Por tanto, al usar la ecuación 4 se tiene que:

$$\varepsilon_i = \frac{v_{st}}{2 * c_i} = \frac{15.7766\ m/s}{2 * 1855\ m/s} = 4252.45\ \mu\varepsilon$$

Lo que corresponde a un 1.47% de error entre la señal que se obtiene en el pulso incidente físicamente y el predicho con la velocidad del percutor.

2.5 Desarrollo de modelo matemático

Una de las razones fundamentales para realizar este trabajo es obtener un modelo matemático que permita establecer la presión a la que se debe calibrar el cañón en función de la velocidad deseada. Para lograr el modelo matemático; primero, se sacaron los promedios de la velocidad del percutor obtenidas con la myRIO a cada presión de trabajo de la Tabla 1 y se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Velocidades promedio del percutor a diferentes presiones en el cañón.

Presión en el cañón (KPa)	Velocidad promedio del percutor (m/s)
137.90	12.34694
172.37	15.72554
206.84	18.43832
241.32	21.12428
275.79	23.260325

De la Tabla 2 se generó una gráfica de la velocidad del percutor contra la presión de trabajo en el cañón que se muestra en la figura 19, en la que además se observa la ecuación polinómica que arroja la regresión en Excel donde es viable obtener la presión del cañón en función de la velocidad deseada para el percutor. La ecuación obtenida tiene un coeficiente de determinación aceptable al ser cercano a uno.

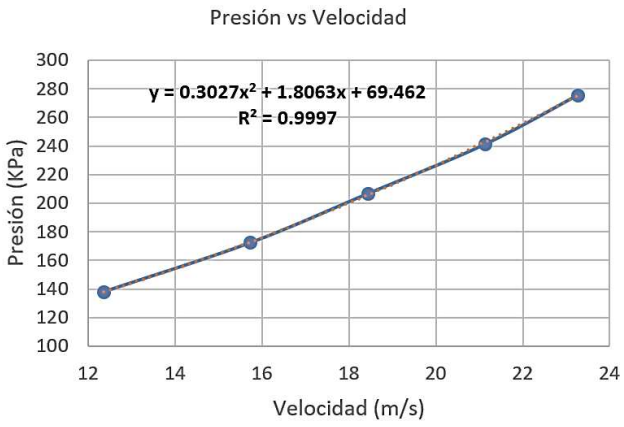


Figura 19. Gráfica de la relación de la velocidad del percutor contra la presión de trabajo del cañón en la Barra de Hopkinson.

En la ecuación (9) se reescribe la ecuación polinomial obtenida de Excel que describe la presión a la que se tiene que calibrar el cañón en función de la velocidad deseada en el percutor:

$$P_C = 0.03027(v_s)^2 + 1.8063(v_s) + 69.462 \quad (9)$$

Donde, P_C es la presión de calibración del cañón en KPa y v_s es la velocidad que se desea tenga el percutor en m/s.

3. Resultados

La corroboración de la medición de la velocidad por parte del sistema implementado en la Barra de Hopkinson Polimérica se realizó midiendo simultáneamente las señales que lee la myRIO a través de un osciloscopio. Los resultados se mostraron en la Tabla 1, donde resalta que la diferencia máxima entre la captura hecha por el osciloscopio y el sistema de la myRIO es de $28.8\ mm/s$ cuando el percutor viajó a $14.0368\ m/s$, lo que equivale a un error de 0.24%. Además, el error promedio de las lecturas de velocidad de la Tabla 1 es de 0.028%.

De las pruebas P1, P6, P9, P11 y P13 reportadas en la Tabla 1, se evaluó la amplitud del pulso incidente ε_i utilizando la ecuación (4) a través de conocer la velocidad del percutor v_{st} y la velocidad longitudinal de la onda para el nailon ($c_i = 1855\ m/s$). Adicionalmente, con los pulsos registrados en las pruebas se realizó la estimación de la amplitud del pulso incidente corregido $|\varepsilon_{IC}|$ con el ajuste de las oscilaciones. En la Tabla 3, se muestran los resultados de la evaluación de la magnitud del pulso incidente tanto con la velocidad del percutor como con las señales generadas en una prueba en vacío con la Barra de Hopkinson. La columna de "Error Porcentual (%)" de la Tabla 3, se evalúa tomando al pulso incidente corregido $|\varepsilon_{IC}|$ como la lectura verdadera ya que se obtiene de los pulsos registrados por las galgas extensiométricas y el pulso incidente estimado ε_i es como su nombre lo dice la estimación del pulso incidente a partir de la velocidad del percutor. Por tanto, el "Error Porcentual (%)" establece que tan alejado estará realmente la magnitud del pulso incidente al establecer una velocidad de impacto del percutor.

Tabla 3. Evaluación de la magnitud del pulso incidente a través de la velocidad del percutor y la señal corregida de pruebas en vacío con Barra de Hopkinson.

No. de prueba	Presión en el cañón (KPa)	Velocidad del percutor (v_{st}) (m/s)	$\varepsilon_i = \frac{v_{st}}{2 * c_i}$	$\lvert\varepsilon_{IC}\rvert$	Error Porcentual (%)
P1	137.9	12.3557	-0.003330377	-0.003171987	4.99%
P6	127.37	15.7766	-0.004252453	-0.004190679	1.47%
P9	206.84	18.4703	-0.004978518	-0.004987734	0.18%
P11	241.32	21.1228	-0.005693477	-0.00579847	1.81%
P13	275.79	23.3805	-0.006302022	-0.006443079	2.19%

La validación de la ecuación 9 consistió en establecer 4 velocidades de prueba para obtener la presión a la cual se ajustó el cañón. Posteriormente, se realizó una prueba en vació con las presiones establecidas y obtener la velocidad real del percutor y la respuesta de los pulsos incidente (ε_{ib}) y reflejado (ε_{rb}) en la barra transmitida. En la Tabla 4, se muestran las cuatro velocidades deseadas (v_s) con las que se desea que impacte el percutor, los resultados de la presión calculada (P_C) para ajustar el cañón, la velocidad real del percutor en la prueba y el porcentaje de error tomando como referencia la velocidad deseada.

Tabla 4. Comparación de la velocidad deseada contra la real a partir de calcular la presión en el cañón.

No. de Prueba	$v_s\ (m/s)$	$P_C\ (KPa)$	$v_{st}\ (m/s)$	% Error
PV1	14	154.10	13.8697	0.93%
PV2	17	187.68	16.8158	1.08%
PV3	20	226.63	19.8586	0.71%
PV4	22	255.73	21.5917	1.86%

Los resultados mostrados en la Tabla 4 muestran que el error máximo en las cuatro pruebas ronda el 1.9% lo cual pareciera que es bueno. Sin embargo, los resultados implican que se tendrían que realizar por lo menos un par de pruebas más alrededor de la presión calculada (P_C) para asegurar tener la velocidad que se desea.

Siguiendo con el análisis de los resultados, de las cuatro pruebas se almacenaron los pulsos incidentes (ε_{ib}) y reflejados (ε_{rb}) como ya se mencionó, que se muestran en las figuras 20 y 21. De ahí, se evaluó el coeficiente de propagación para cada prueba y se corrigieron los pulsos incidentes (ε_{IC}) al extremo de contacto de la barra incidente con el percutor.

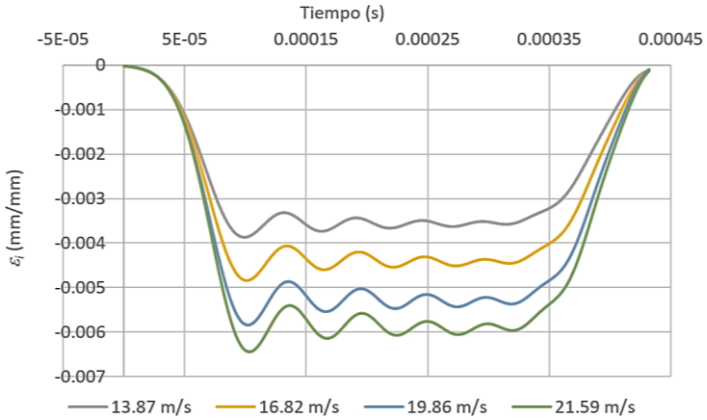


Figura 20. Pulsos incidentes ε_{ib} de las pruebas PV1 a PV4.

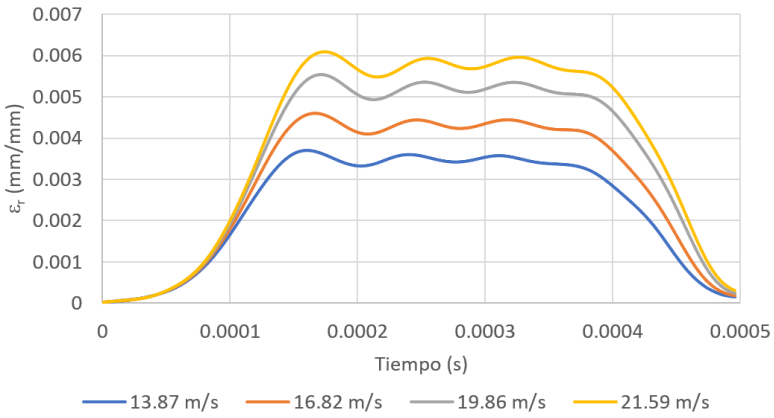


Figura 21. Pulsos reflejados ε_{rb} de las pruebas PV1 a PV4.

En la figura 22, se muestran los puntos que se utilizaron para calcular el valor promedio de la amplitud del pulso incidente $|\varepsilon_{IC}|$, únicamente tomando en cuenta la zona de las oscilaciones.

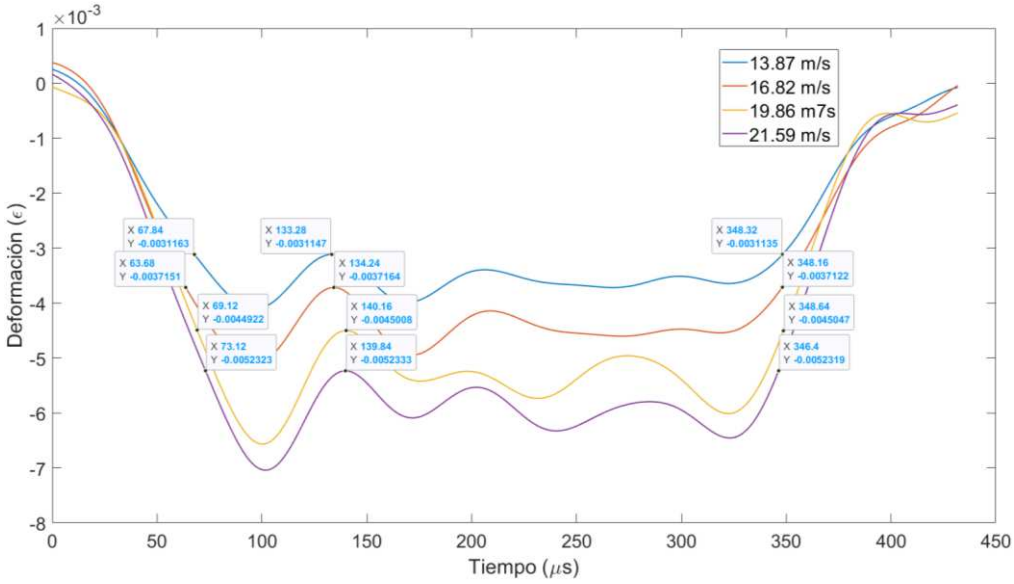


Figura 22. Pulsos incidentes corregidos ε_{IC} de las pruebas PV1 a PV4 donde se identifican los puntos para calcular el valor estable de la señal.

En la figura 23, se muestra la región donde quedó la evaluación de la magnitud del pulso incidente corregido $|\varepsilon_{IC}|$ en estado estable para las pruebas PV1 a PV4; además, se aprecia más claramente que en las pruebas PV1 y PV2 coinciden la amplitud del pulso con la tendencia de la estabilidad de la señal.

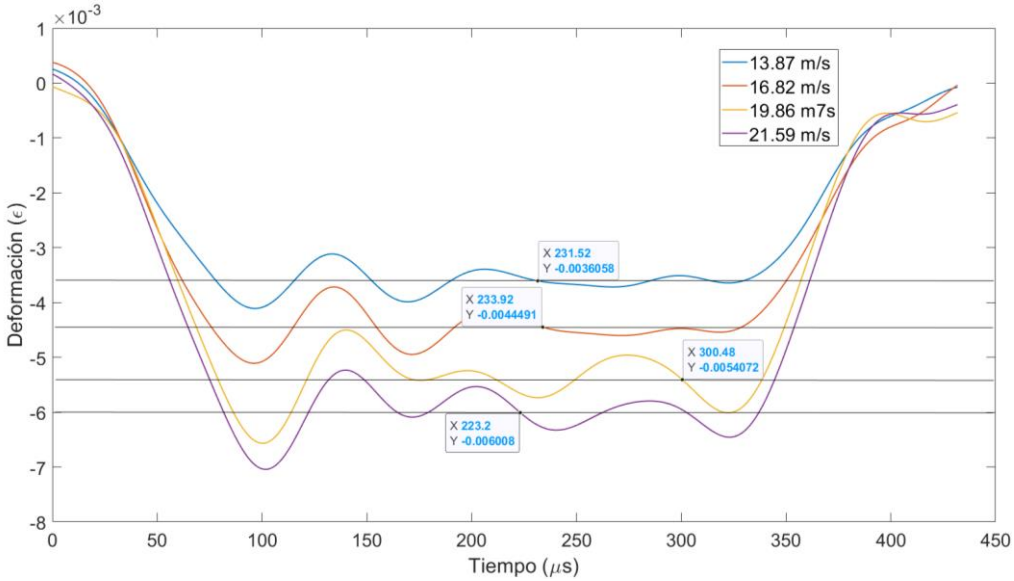


Figura 23. Pulsos incidentes corregidos ε_{IC} de las pruebas PV1 a PV4 donde se identifican las amplitudes en estado estable que tendrían los pulsos.

En la Tabla 5, se presentan los resultados de evaluar la magnitud de los pulsos incidentes evaluados con la velocidad del percutor y la que corresponde con las señales corregidas que se obtuvieron en la prueba en vacío con la Barra de Hopkinson. Finalmente, cabe destacar de estos

resultados que el error entre la predicción del pulso incidente a partir de la velocidad del percutor contra lo que realmente ocurre sigue siendo menor al 5%.

Tabla 5. Evaluación de la magnitud del pulso incidente a través de la velocidad del percutor y la señal corregida de pruebas en vacío con Barra de Hopkinson para las pruebas de validación de resultados.

No. de prueba	Presión en el cañón (KPa)	Velocidad del percutor (v_{st}) (m/s)	$\varepsilon_i = \frac{v_{st}}{2 * c_i}$	$\lvert\varepsilon_{IC}\rvert$	Error Porcentual (%)
PV1	154.097886	13.8697	-0.003738464	-0.003605892	3.68%
PV2	187.6753672	16.8158	-0.004532561	-0.004448168	1.90%
PV3	226.6307612	19.8586	-0.005352722	-0.005408038	1.02%
PV4	255.7266484	21.5917	-0.005819865	-0.006006598	3.11%

4. Conclusiones

El desarrollo de sistemas tecnológicos que se utilicen para la caracterización de materiales que sean validados a partir de los fundamentos teóricos tiene una gran relevancia, ya que se asegura que el sistema implementado tiene el sustento suficiente para dar la certeza que las mediciones que se realicen serán las correctas.

Ahora bien, en lo que respecta al proyecto la implementación del sistema para medir la velocidad del percutor en la Barra de Hopkinson Polimérica tiene un error de 0.0276%, lo que indica que la velocidad está correctamente medida. Para lograr esta certidumbre se realizó:

- La caracterización de los sensores optoeléctricos marca SICK modelo GTB6-P4211 a través de la implementación de un sistema de medición de la velocidad de un servomotor. Donde se obtuvo que el tiempo que tarda en realizar la transición a alto es de $4.8\ \mu s$ y la transición a bajo de $216.8\ \mu s$ siendo que el fabricante indica que tiene un tiempo de respuesta menor a los $625\ \mu s$.
- Se realizó el modelado, manufactura e implementación de los soportes que sujetan los sensores optoeléctricos. Para el modelado de los soportes se basó en las dimensiones que otorga el fabricante en la hoja de datos del sensor y en la dimensión del tubo de la guía del cañón. En el caso de la manufactura de los soportes se realizó con impresión 3D por medio del modelado por deposición fundida con PLA como material de aporte. En el caso de la implementación se realizaron orificios al extremo de la guía del cañón por donde sale el percutor quedando la activación de los dos sensores a una distancia de $221.5\ mm$.
- Se desarrolló una aplicación en LabVIEW que se implementó en una myRIO teniendo una velocidad de muestreo de cerca de $580\ KHz$. La aplicación primeramente permite que el usuario establezca la velocidad que se desea tenga el percutor y arroja la presión que debe de tener el depósito del cañón. Además, entrega la velocidad que lee el sistema.
- Se realizaron 15 pruebas donde se monitorea el sistema implementado para medir la velocidad con un osciloscopio configurado a una velocidad de muestreo de $6.25\ MHz$ y el myRIO trabajando a $40MHz$ pero con un tiempo ciclo de $1.725\ \mu s$, por lo que el monitoreo con el osciloscopio fue 10.78 veces más rápido. Dando un error máximo en todas las pruebas de 0.24%.

También se generó una ecuación polinómica que permite al usuario definir la velocidad con la que desea que el percutor impacte a la barra incidente y dicha ecuación da la presión a la que hay que calibrar el depósito del cañón. Para la validación de esta ecuación se establecieron 4 velocidades de impacto y el error promedio entre la velocidad deseada y la real fue de 2.43%. Una de las rozones por la que no se logró la velocidad objetivo es por el cambio de las propiedades del aire comprimido en

función de la temperatura, por lo que se recomienda utilizar nitrógeno como gas para impulsar al percutor.

Adicionalmente, se estudió la validez de la teoría que indica que la magnitud del pulso incidente (ε_i) es función de la velocidad del percutor v_{st} y la velocidad longitudinal de la onda (c_i), por lo que para corroborar esta teoría se hizo lo siguiente:

- Se realizaron 9 pruebas en vacío a diferentes velocidades de impacto del percutor con la Barra de Hopkinson Polimérica. La prueba en vacío consiste en impactar únicamente la barra incidente con el percutor.
- Se midieron los pulsos incidentes (ε_i) y reflejados (ε_r) de la onda a través de la implementación de un puente completo de Wheatstone a la mitad de la barra incidente y las señales fueron registradas por un oscilocopio a una velocidad de muestreo de $6.25\ MHz$.
- Se evaluó el coeficiente de propagación de la onda ($\gamma(\omega)$) para poder predecir los pulsos a lo largo de la barra incidente. Este parámetro se evalúa debido a que el nylon que es el material de las barras genera atenuación y dispersión de onda debido a las propiedades viscoelásticas del material.
- Con el coeficiente de propagación de la onda ($\gamma(\omega)$) se logró estimar el pulso incidente corregido (ε_{IC}) en el extremo de contacto entre la barra incidente y el percutor.
- Se evaluó la magnitud del pulso corregido de la onda incidente ($|\varepsilon_{IC}|$a partir de evaluar el promedio de la señal en la zona de mayor amplitud del pulso.
- Se evalúo la amplitud del pulso incidente (ε_i) en función de la velocidad del percutor v_{st} y la velocidad longitudinal de la onda (c_i) para las 9 pruebas.
- Se evaluó el error que se tiene entre las magnitudes de los pulsos incidentes corregidos ($|\varepsilon_{IC}|$) y las magnitudes de los pulsos (ε_i) evaluados con la velocidad del percutor, tomando como referencia los pulsos incidentes corregidos. Donde el error promedio oscila alrededor de 2.26%.

Por tanto, se puede concluir que el sistema de medición de la velocidad del percutor funciona correctamente y que la predicción de la magnitud del pulso incidente en estado estable es viable a partir de la velocidad del percutor.

Referencias

[1] Chen, W. W., & Song, B. Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications. Springer. EU. 1ra Edición. 2011.
[2] Gallina, F., Birch, R. S., & Alves, M. Design of a split hopkinson pressure bar. 17th International Congress of Mechanical Engineering. ABCM Engineering. Sao Paulo. 2003.
[3] Corona L., Abarca G. & Mares J. Sensores y actuadores: aplicaciones con Arduino. Grupo Editorial Patria. México. 1ra Edición. 2016.
[4] Anuchin, A., Dianov, A. & Briz, F. Synchronous Constant Elapsed Time Speed Estimation using Incremental Encoders. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. IEEE. Volumen 24. Número 4. 2019.
[5] Fotocélulas miniatura G6, SICK, https://www.sick.com/es/es/fotocelulas/fotocelulas/g6/gtb6-p4211/p/p246949, consultada el 25 de enero de 2023.
[6] Bagusat, F., & Rohr, I. The role of the modified taylor impact test in dynamic material research. 11th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading. EPJ Web of Conferences. Freiburg, Germany. 2015.
[7] Full-Bridge Type III, NI, https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-wireless-sensor-network-module/page/niwsnhelp/full3.html, consultada el 13 de diciembre de 2022.
[8] Bacon, C. An experimental method for considering dispersion and attenuation in a viscoelastic Hopkinson bar. Experimental Mechanics 38, 242–249. 1998.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 12, pp. 154 – 165
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Implementación de un sistema difuso tipo Sugeno para estimar la dificultad en sopas de letras

González Gómez Yasarit Erasmo, Martínez Reyes Magally, Serrano Pérez Edgar, Soberanes Martín Anabelem

Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario Valle de Chalco
josef_1811@hotmail.com

Resumen

La investigación toma como punto de partida la necesidad de medir la dificultad que se le presenta a los estudiantes a la hora de aprender la escritura del idioma español en niños de 6 a 10 años en México; fomentando la gamificación. Se sabe que el proceso de aprendizaje de la escritura es largo y continuo, es entendible que los errores ortográficos y el tiempo que le toma a los estudiantes en responder las actividades tienen que ser analizadas por medio de la lógica difusa, ya que es un proceso no-lineal. Analizando los datos del tiempo de reacción y el número de errores ortográficos de los estudiantes por medio de un sistema difuso tipo Sugeno para estimar la dificultad de resolver un ejercicio de sopa de letras. La base del conocimiento fue representada a través de un sistema reglas y el mecanismo de inferencia difuso. Siguiendo el modelo lineal para la creación del software ya que se centra en el análisis. La implementación del sistema difuso tipo Sugeno que se realizó utilizando el software Matlab y se analizó su desempeño mediante un caso de estudio, a fin de confirmar que el sistema difuso estima eficiente la dificultad que un usuario presenta al utilizar el juego de sopa de letras.

Palabras clave: Errores Ortográficos, Tiempo de reacción, Estilo de aprendizaje, Lógica difusa, Sugeno.

1. Introducción

La definición de ortografía es tan amplia como se desea interpretar, para Vernon el conocimiento ortográfico tiene una influencia positiva sobre la compresión lectora y, obviamente, sobre la capacidad de expresarse por escrito [1] en la definición anterior se toma en cuenta el contexto fonético, hay otros autores que mencionan que la ortografía “es un proceso consciente y deliberado, que requiere un conocimiento de la estructura lingüística y una buena memoria visual” [2].

Tomando como base lo anterior se puede mencionar que los errores ortográficos surgen de las irregularidades ortográficas que se presentan y que derivan en regularidades que no siempre coinciden con la norma establecida [3] o el orden establecido de una palabra.

Es bien sabido que la “escritura es una competencia básica para el desarrollo del aprendizaje” [4], por eso es necesario incentivar que el “alumnado se adueñe de la norma ortográfica y, para ello, es necesario considerar la ortografía como un subproceso en la producción de textos” [5] para ampliar su conocimiento.

El conocimiento para Moreno “vive y se alimenta de la imposibilidad traumática del acceso a la verdad” [6] se puede decir que esta “epistemología se ha centrado en la verdad como atributo esencial del conocimiento, destacando la naturaleza abstracta, estática y no humana del conocimiento expresado en proposiciones y en una lógica formal” [7], es algo que frecuentemente como seres humanos buscamos adquirir para nuestro beneficio o para posterior utilización, y como primer paso podemos decir que “es un proceso humano dinámico de justificación de la creencia personal en busca de la verdad” [7].

El dominio de un tema es en sí el conocimiento que tenemos de dicho tema a través de esa verdad, pero ¿Cómo es que los profesores pueden medir el nivel de conocimiento de los estudiantes sobre las palabras de la lengua española?, en la actualidad podemos decir que somos hablantes nativos y que dentro de nuestra educación pasamos las materias de español, eso nos atribuye que tenemos un dominio de la palabra española, pero no tenemos una idea clara ¿Cuál es el conocimiento que tenemos sobre la palabra en la lengua española?, pero antes de llegar a esa verdad es necesario conocer el grado de dificultad que las palabras en la lengua española representan.

La visión es un sentido primordial para el ser humano, ya que nos ayuda a conocer lo que nos rodea, podemos decir que “la precepción visual constituye un proceso cognitivo que da lugar a una relación operativa, práctica y adecuada con el medio en el que vivimos” [8]. Siendo la visión uno de los factores que influye en el tiempo de reacción que “es aquel que transcurre entre la aparición del estímulo y la realización de la respuesta” [10].

Esta respuesta que el individuo realiza desemboca en “una serie de tareas entrelazadas: las primeras corresponden al trabajo de la apropiación del mundo por medio de la orientación práctica, a través de movimientos de apertura, apropiación y ejecución, que actúan en colaboración con la vista y el tacto” [11]. Por lo que un medio visual siempre será un estímulo para el aprendizaje.

Los estilos de aprendizaje son variables personales que, a mitad de camino entre la inteligencia y la personalidad, explican las diferentes formas de abordar, planificar y responder entre las demandas del aprendizaje [12], estas demandas que el individuo realiza para percibir el mundo tienen que ser orientadas o estructuradas.

Estas orientaciones o estructuras recaen en los diferentes modelos de aprendizaje. Por ejemplo, el modelo VAK “permite identificar el mejor de los tres canales de percepción: visual, auditivo y kinestésico” [13]. Estas representaciones perceptivas que acabamos de mencionar “se enmarcan en las capacidades y limitaciones impuestas por la organización y estructura de los sistemas biológicos que las sustentan” [8].

La lógica difusa procura “crear aproximaciones matemáticas en la resolución de ciertos tipos de problemas” [14] para otros autores es “un método de razonamiento aproximado no probabilista, que puede definirse como una extensión de la lógica multivaluada que facilita enormemente el modelado de información cualitativa de forma aproximada” [13].

La gran diferencia entre la lógica difusa y la lógica clásica es que tiene fronteras imprecisas manejando el razonamiento aproximado [15]. Por esta razón es necesario dar a esa aproximación una variable lingüística, ya que esta es “una variable cuyos valores son palabras o sentencias en un lenguaje natural o sintético (no números)” [16].

Esto a su vez forman los conjuntos difusos que son una colección bien definida de elementos, en la que es posible determinar para un objeto cualquiera, si acaso pertenece o no al conjunto, en un universo dado [9] y definimos al universo del discurso como “todos los posibles valores que puede tomar una determinada variable” [13].

Para asociar o asignar el grado de pertenencia nos podemos apoyar con las funciones de pertenencia podemos decir que “cualquier función sería válida para definir conjuntos difusos” [17], las funciones de pertenencia se crean dependiendo de lo que se requiera “esto se debe tanto a la facilidad de computación que su uso conlleva como a su estructura lógica para definir un valor lingüístico asociado” [17].

Para ejemplificar lo anterior se tomará la función triangular, que se muestra en la figura 1. Para que el proceso se lleve a cabo es necesario la implementación de las reglas difusas que es un razonamiento aproximado que se utiliza para presentar y razonar el conocimiento expresado en lenguaje natural [13].

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & si\ x \leq a \\ \dfrac{x-a}{m-a} & si\ a < x \leq m \\ \dfrac{b-x}{b-m} & si\ m < x \leq b \\ 0 & si\ x \geq b \end{cases}$$

Figura 1. Función triangular [17].

Para poder estructurar y generar un producto funcional es necesario seguir una metodología por emplear; para este desarrollo se seleccionó la lineal o secuencial, ya que, para comprender la naturaleza de los programas a construirse, el ingeniero debe comprender el dominio de información del software, así como la función requerida, comportamiento, rendimiento e interconexión [18], ya que cuenta con una secuencia a seguir como se muestra en la Figura 2.

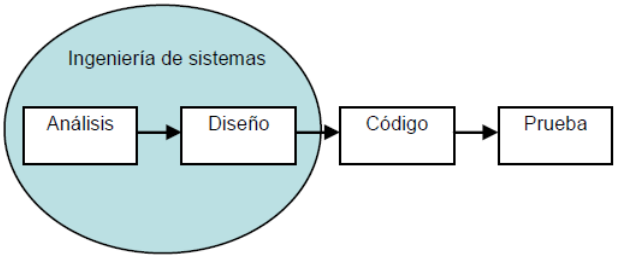


Figura 2. Modelo lineal secuencial [19].

La interacción entre el proceso de enseñanza aprendizaje que involucra a los docentes y los estudiantes es conocer de manera puntual las dificultades que se le presentan al estudiante a la hora de aprender, digamos que "cuando se desarrolla una competencia derivada de un proceso de formación, que además culmina en un proceso de evaluación auténtica y produce una evidencia de desempeño"[20] por eso es necesario generar esa información, y en este caso el sistema difuso es quien analizara las respuestas del estudiante para determinar si se respondió de manera adecuada, o no dicho ejercicio. En materias que usualmente son cuantitativas es difícil tener parámetros para poder decidir el desempeño.

¿Cuáles son los aprendizajes esperados que se alcanzaron de manera específica? Y es por eso qué en ocasiones no se conoce la dificultad que le representa una palabra a un alumno, ya que no se tiene como referentes o antecedentes que nos puedan decir ¿cuáles son los aspectos para tomar en cuenta para poder decir que se tiene una dificultad sobre una palabra? Y si detectamos que un alumno tiene problemas con una palabra ¿Cómo motivamos a los alumnos a realizar los ejercicios con dicha palabra?

Hay APK´s o App que por medio del tradicional juego de sopa de letras ayuda a reafirmar la ortografía del estudiante o usuario. El software que se propone estará compuesto por diversos módulos y se centraran en el sistema de aprendizaje del lenguaje natural de español, se plantea realizar un juego tipo sopa de letras, por lo que se analizaran diferentes apps que se encuentran en el mercado actualmente. Las apps que se analizaran son las siguientes: aplasta palabras desarrollada por FINGERLAB y sopa de letras de español desarrollada por BLACKOUT LAB.

Figura 3. App Aplasta palabras elaboración propia tomando como base las pantallas de la App Aplasta palabras.

En la información del juego se aprecia que lo que busca el aplicativo es ampliar su vocabulario jugando, memorizando y practicando la ortografía de las palabras, cómo se muestra en la Fig. 3.

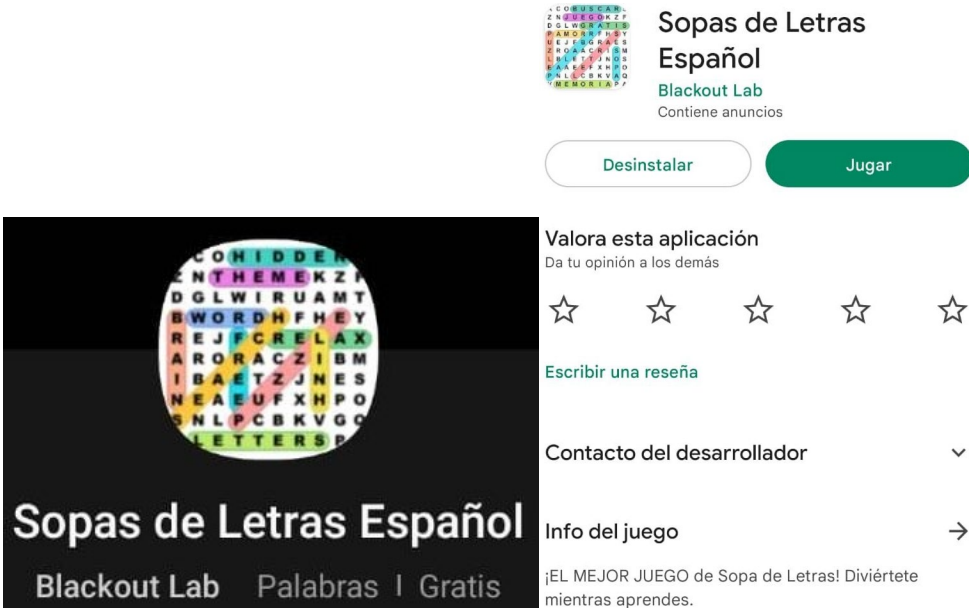


Figura 4. App Sopa de letras elaboración propia tomando como base las pantallas de la App Sopas de letras español.

Como se aprecia en la información general de la app en la Figura 4, lo que buscan los desarrolladores es que puedan aprender mientras se divierten seleccionando sus temas favoritos.

En la actualidad no hay un aplicativo en el mercado que involucre la lógica difusa y pueda determinar el grado de dificultad de cada palabra para los estudiantes y como es asociado para determinar el nivel de dominio que el estudiante tiene para la palabra.

Crear un APK con la reinvención del juego sopa de letras para reafirmar el conocimiento de la palabra en la lengua española. Empleando la lógica difusa, poder determinar el grado de dificultad que tiene cada palabra para cada estudiante, por medio de los errores ortográficos y el tiempo de reacción que cada estudiante tiene.

Sí se crea el software que implementa la lógica difusa ayudará a dar a conocer el nivel de dificultad que cada alumno tiene con respecto de cada palabra que le aparezca en el APK. Para ello, en el diseño se usarán Matlab para generar los algoritmos que estiman la dificultad durante la experiencia de juego de un usuario.

2. Metodología

2.1. Análisis

Se definieron dos entradas para el sistema difuso tipo Sugeno; la primera es “erroresortograficos” y la segunda entrada fue definida como “tiempodereaccion”.

Las funciones de membresía triangulares de la entrada “erroresortograficos” son tres y se designaron como “pocas”, “regulares” y “muchas”. El universo del discurso de dicha entrada va de 0 a 12 errores; considerando el número máximo de errores que puede cometer el estudiante durante el intento de una palabra. En la aplicación al alcanzarse el número máximo de errores, el sistema cambia a otra palabra.

En este sentido, los parámetros de las funciones de membresía triangulares para la función “pocas” son 0, 0.5 y 5. Por su parte, para la función de membresía “regulares” son: 3, 6 y 9. Finalmente, los parámetros de la función de membresía “muchas” con: 6.5, 12 y 12. Tal y como se observa en la Figura 5, elaborada en Excel.

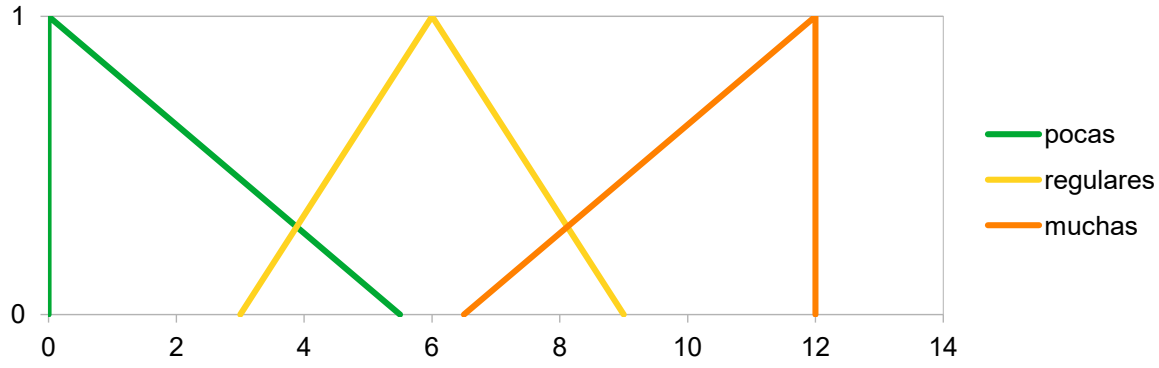


Figura 5. Representación geométrica de la entrada “erroresortograficos” con sus funciones de membresía. Elaboración propia.

Por otra parte, en el caso de la segunda variable de entrada “tiempodereaccion” las funciones de membresía se definieron “lento”, “normal” y “rapido” también con una geometría triangular cada una de ellas.

Para el caso de la función de membresía que se definió como “lento” los parámetros se definieron 28, 60 y 60 y para el caso de la función de membresía “normal” los valores son 8,28 y 48. Por último, la función de membresía “rapido” cuenta con la definición de parámetros con 0, 0 y 18. De esta manera, el universo del discurso es de 0 a 60 segundos, que considera como el tiempo máximo en el que el usuario puede realizar un intento, tal y como se observa en la Figura 6, elaborada en Excel.

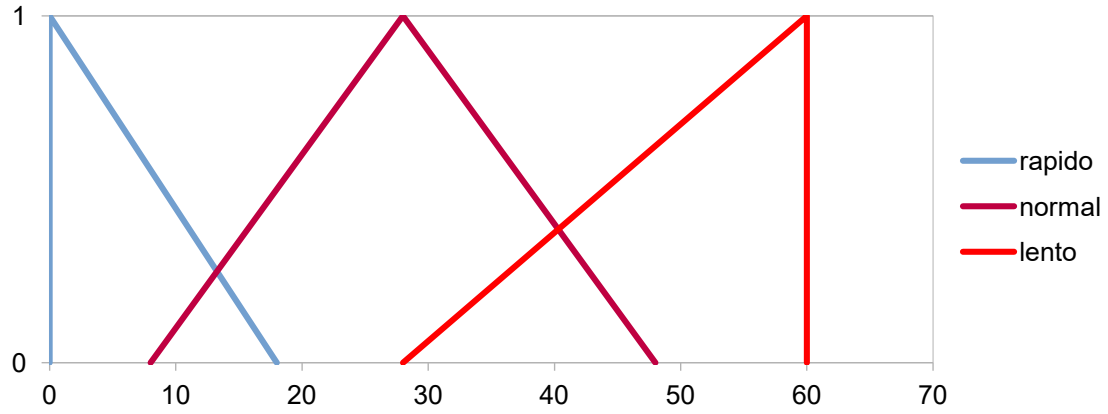


Figura 6. Representación geométrica de la entrada "tiempodereaccion" con sus funciones de membresía. Elaboración propia.

La única salida del sistema es la variable "dificultad". Consta de tres constantes definidas como "alta", "media" y "baja".

El parámetro de "alta" se definió como la constante 3. Por su parte, "media" como la constante 6. Por último, "baja" tiene como parámetro la constante 10.

Los parámetros se seleccionaron basado en un sistema de calificación, considerando que una baja calificación se obtiene al presentarse una alta dificultad y recíprocamente, una alta calificación al presentarse una baja dificultad. De esta manera, las constantes se distribuyeron dentro del universo del discurso de 0 a 10 dentro del grado de dificultad alcanzable para el sistema, como se puede observar en la Figura 7, elaborada en Excel.

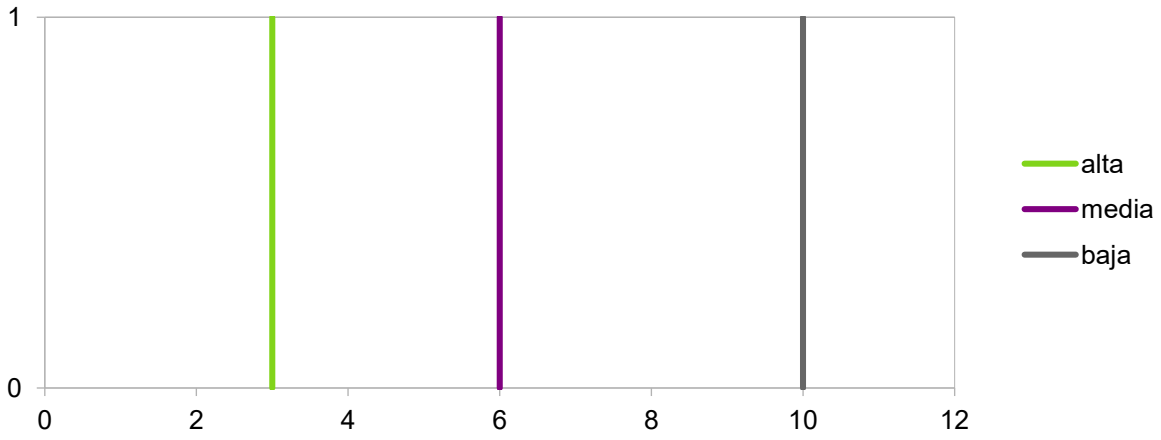


Figura 7. Representación geométrica de la salida "dificultad" con sus funciones de membresía. Elaboración propia.

El mecanismo de inferencia que nos permite generar relaciones entre las entradas y la salida se forma a partir de un conjunto de reglas con la estructura "Si… entonces" tal y como se observa en la Tabla 1, elaborada en Excel.

Tabla 1. Sistema de base de reglas para el sistema difuso tipo Sugeno. Elaboración propia.

Número de regla	Regla con estructura "Si… entonces"
1	**Si** "erroresortograficos" es "pocas" **y** "tiempodereaccion" es "rapido" **entonces** "dificultad" es "baja".
2	**Si** "erroresortograficos" es "regulares" **y** "tiempodereaccion" es "rapido" **entonces** "dificultad" es "media".
3	**Si** "erroresortograficos" es "muchas" **y** "tiempodereaccion" es "lento" **entonces** "dificultad" es "alta".
4	**Si** "erroresortograficos" es "pocas" **y** "tiempodereaccion" es "normal" **entonces** "dificultad" es "media".
5	**Si** "erroresortograficos" es "regulares" **y** "tiempodereaccion" es "normal" **entonces** "dificultad" es "media".
6	**Si** "erroresortograficos" es "muchas" **y** "tiempodereaccion" es "normal" **entonces** "dificultad" es "alta".
7	**Si** "erroresortograficos" es "pocas" **y** "tiempodereaccion" es "lento" **entonces** "dificultad" es "media".
8	**Si** "erroresortograficos" es "regulares" **y** "tiempodereaccion" es "lento" **entonces** "dificultad" es "alta".
9	**Si** "erroresortograficos" es "muchas" **y** "tiempodereaccion" es "rapido" **entonces** "dificultad" es "alta".

2.2. Desarrollo e Implementación en Matlab

El análisis realizado es el punto inicial para realizar el desarrollo e implementación en el lenguaje Matlab. Se seleccionó la estructura del sistema del tipo Sugeno y se ingresaron tanto las entradas "erroresortograficos" y "tiempodereaccion" con sus respectivas funciones de membresía. Como la definición de la salida "dificultad" con sus respectivos parámetros constantes, tal como se muestra en la Figura 8.

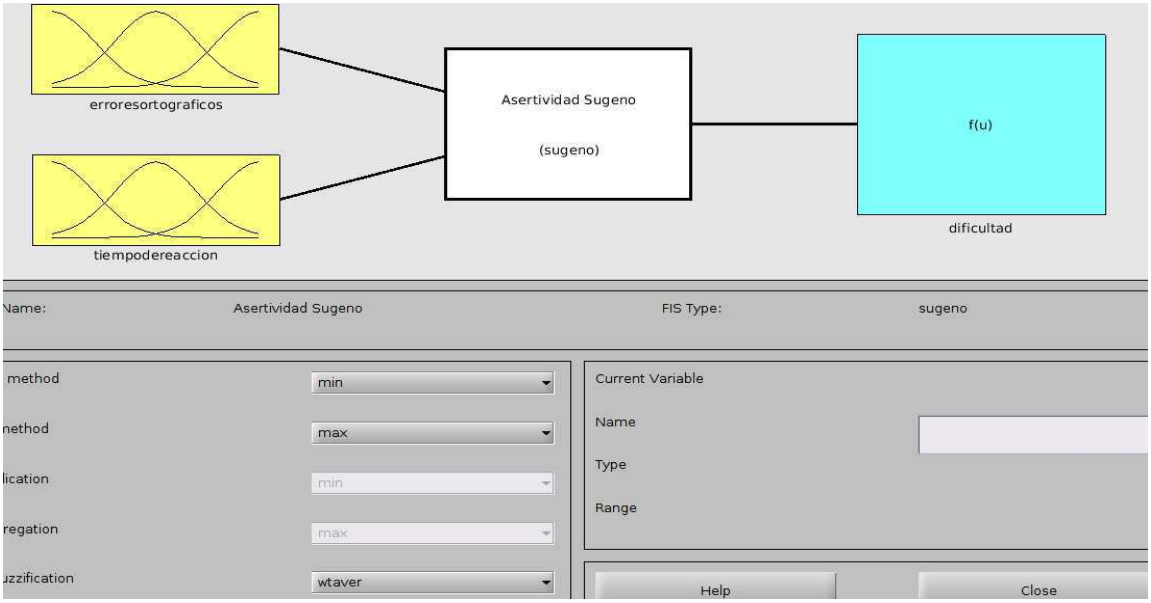


Figura 8. Estructura tipo Sugeno en el ambiente Matlab. Elaboración propia.

Para la definición de la base de reglas del conocimiento, se utilizaron las reglas planteadas durante la etapa de análisis, de tal manera que se realizó la definición de ellas en el ambiente de desarrollo Matlab, cómo se visualiza en la Figura 9.

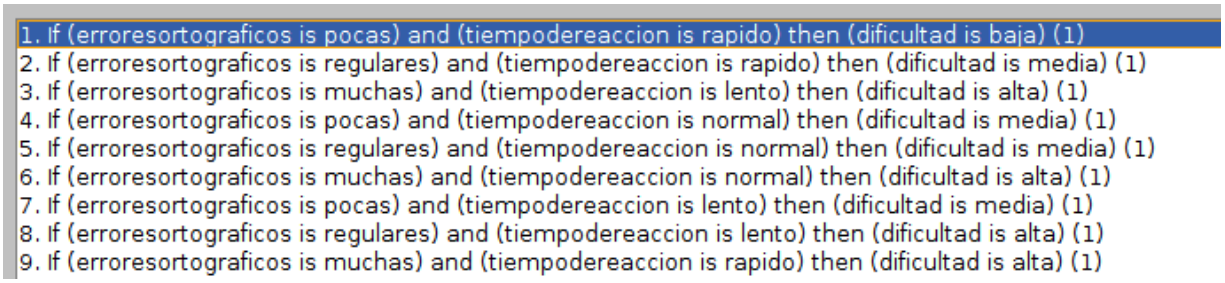


Figura 9. Base de reglas del conocimiento para el sistema difuso tipo Sugeno implementado en Matlab. Elaboración propia.

El mapeo de las entradas “erroresortograficos” y “tiempodereaccion” con la salida “dificultad” se procesó a través del sistema de reglas e inferencia difusa con relación a la base de reglas previamente definidas, por lo que, al utilizar el visor de superficie de control, se obtiene un gráfico en 3D donde se observa el comportamiento de la salida a partir de la evaluación de las entradas del sistema, cómo se observa en la Figura 10.

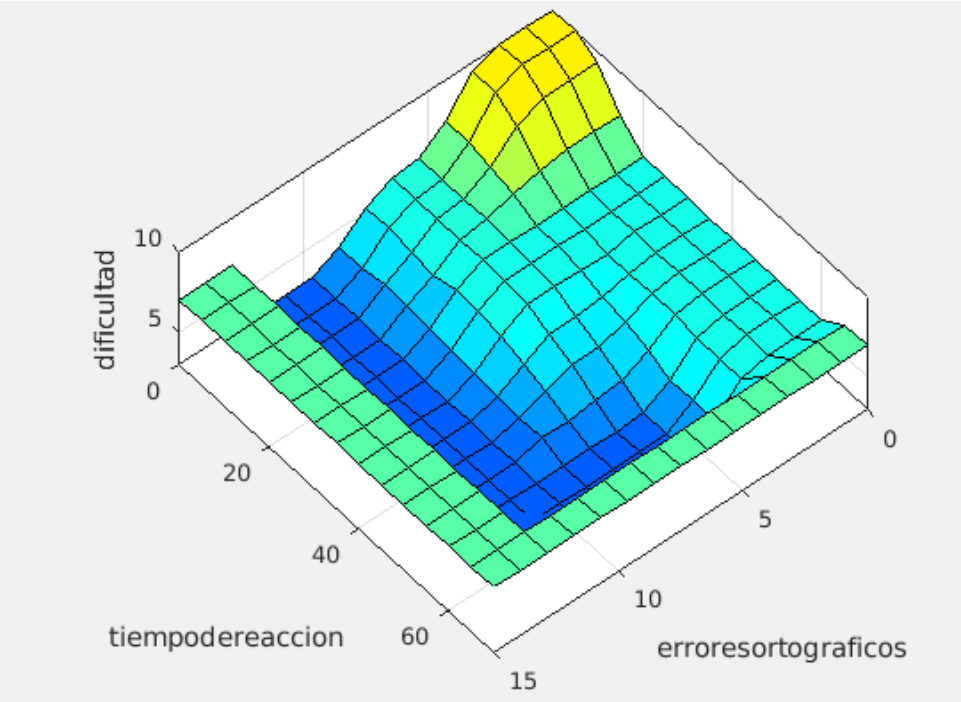


Figura 10. Visor de superficie de control del sistema difuso tipo Sugeno. Elaboración propia.

En el visor de la superficie de control, se observa gráficamente una tendencia descendente para la variable de salida “dificultad”, recordando que un valor cercano a 3 representa la máxima dificultad alcanzable, en relación con un incremento en el número de errores ortográficos. La región de dominio para la función de “alta” dificultad se encuentra definida como la región en color azul marino. Por el contrario, la región de “baja” dificultad se encuentra resaltada en color amarillo y se accede a ella a través de la predominancia de una combinación de “pocos” errores ortográficos y un tiempo de reacción “rapido”. En este sentido, la variable de “tiempodereaccion” contribuye al refuerzo de la tendencia de la variable “erroresortograficos” pero no de una forma proporcional, ya que, en la definición de la base de

reglas del conocimiento, se considera que es posible tener pocos errores ortográficos al dedicar tiempo suficiente para analizar detenidamente el ejercicio a resolver. De esta manera, el sistema difuso tipo Sugeno de 2 entradas y 1 salida logra satisfactoriamente emular la toma de decisiones no-lineal a través del conocimiento experto, para determinar eficientemente la dificultad que se presenta al realizar un ejercicio como el que se ha planteado en este trabajo.

3. Resultados.

En esta fase se realizaron las pruebas pertinentes, por lo cual es posible generar un caso de estudio que se explicará a continuación; se fijan valores a las 2 entradas a fin de corroborar el funcionamiento del sistema y obtener un valor de la salida “dificultad”. Para la prueba, se considera el ingreso de 5 errores ortográficos en la primera variable que es “erroresortograficos” y 50 segundos que le toman aún estudiante en resolver dicha palabra que es nuestra segunda variable de entrada la cual se llama “tiempodereacción”, lo que resulta en 3.36 en nuestra variable de salida que se llama “dificultad” esto nos indica el grado de dificultad que le tomo al estudiante responder la palabra, tal y como se observa en la Figura 11.

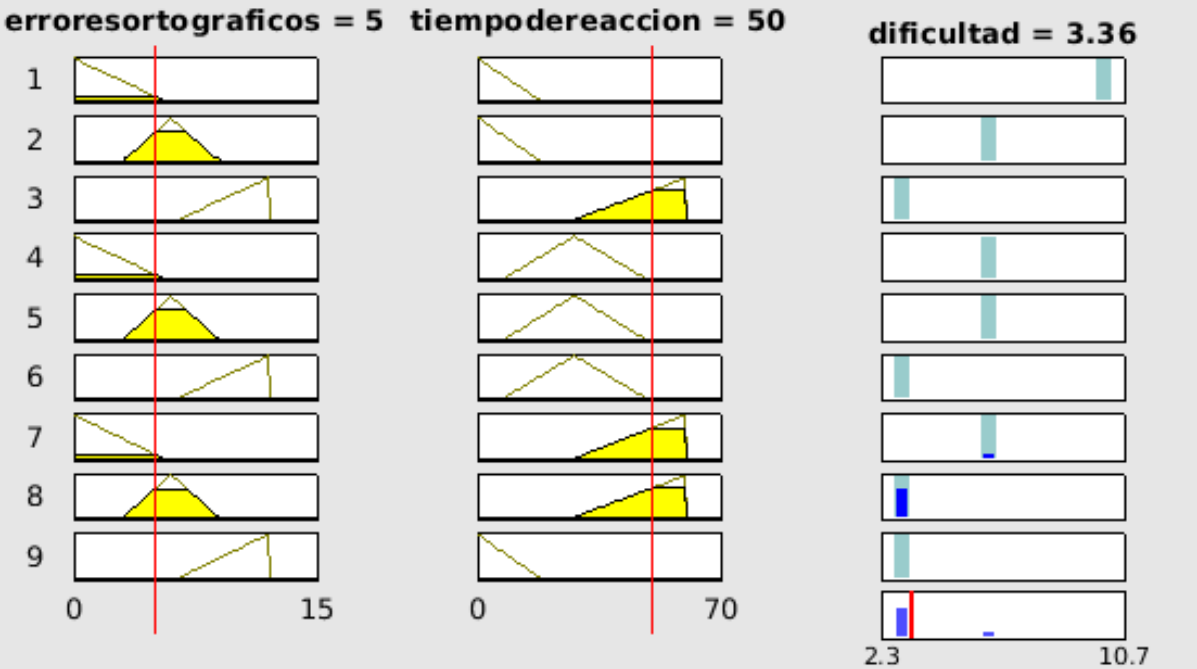


Figura 11. Visor de evaluación de reglas del sistema difuso tipo Sugeno con entradas [5;50] obteniendo una dificultad de 3.36. Elaboración propia.

Se observa que, en este caso, la contribución de la variable “erroresortograficos” se sitúa predominantemente en la variable “regulares”. Además, para la variable “tiempodereaccion”, se activa únicamente la función “lento”, por lo que la regla de mayor influencia es la número 8. La regla 7 también se activa y representa una contribución significativa para el sistema de inferencia, aunque en menor medida. Al obtener un valor de 3.36 para la variable de salida, se deduce que el intento del usuario se sitúa alrededor de la predominancia de la función de dificultad “alta”; es decir, que a partir de este resultado el sistema debe realizar ajustes para reducir la complejidad de la palabra, a fin de que en el siguiente intento. Esto con el objetivo de que, en el siguiente intento, el usuario reduzca el número de errores y/o el tiempo requerido para completar el intento. Se deduce que el mantener una alta o baja dificultad para el usuario durante su uso, puede persuadir a dejar de utilizar la aplicación, al incrementar o disminuir significativamente la carga cognitiva el usuario que termina por desvincular el interés en su uso.

En el ejemplo de prueba abordado, al reducir el número de errores y evaluar la primera entrada con el valor numérico de tres y mantener el mismo tiempo; es decir cincuenta segundos de “tiempodereaccion”, se obtiene una salida de “dificultad” de 6, alrededor de la función “media”, lo que implica una reducción en la misma, tal y como se observa en la Figura 12.

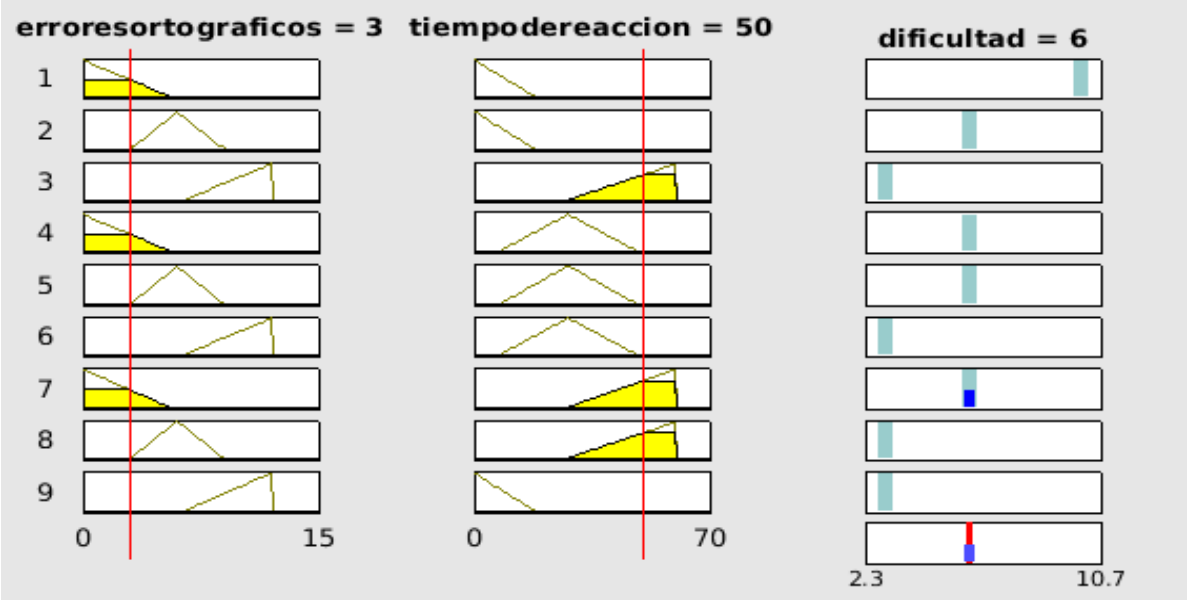


Figura 12. Visor de evaluación de reglas del sistema difuso tipo Sugeno con entradas [3;50] con el que se obtiene una dificultad de 6. Elaboración propia.

Finalmente, al considerar que es posible reducir progresivamente tanto el número de errores y disminuir el tiempo para completar el ejercicio, el sistema tiene la capacidad de estimar que en el proceso se ha reducido significativamente la dificultad hasta llegar al predominio de la función “baja” lo que indica que al usuario se alcanzó la condición en la cual al usuario se le presentó un ejercicio sencillo de resolver. Para corroborar el funcionamiento en el visor de reglas de Matlab, se evaluó el caso en el que el usuario solo presenta dos errores en un tiempo de trece segundos, obteniendo una salida de dificultad 8.11, que representa un intento de poca dificultad para el usuario, tal y como se observa en la Figura 13.

Figura 13. Visor de evaluación de reglas del sistema difuso tipo Sugeno con entradas [2;13] obteniendo una dificultad de 8.11. Elaboración propia.

De esta manera se ha probado que el sistema opera satisfactoriamente en el caso de estudio analizado. Actualmente, se trabaja en la implementación del sistema difuso de tipo Sugeno a través de un método que se está codificado e integrando al juego sopa de letras que ya se encuentra desarrollado [21] en la plataforma de desarrollo Flutter, por lo que se tiene versión preliminar de la adaptación de la aplicación que se puede observar en la Figura 14.

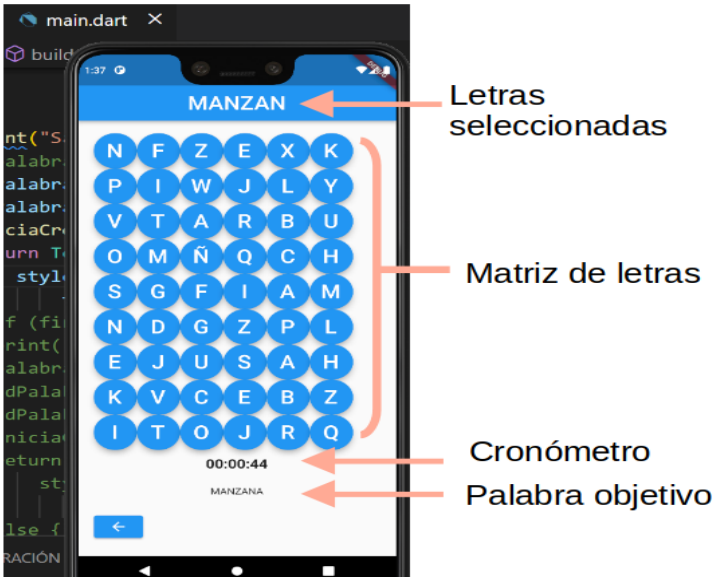


Figura 14. Interfaz gráfica de la aplicación de sopa de letras en desarrollo. Elaboración propia.

La aplicación muestra la palabra que el usuario debe completar al seleccionar una por una las letras que se despliegan en forma matricial. Se cuenta con un sistema de cronometraje para capturar el tiempo que le ha tomado al usuario realizar un intento. Una vez que se completa la palabra, se envían los datos de entrada al sistema difuso tipo Sugeno; es decir, los tres errores ortográficos y los cincuenta segundos utilizados durante el intento. Con estos datos de entrada, el sistema debe efectuar el mapeo de las entradas con la salida para estimar la dificultad que se ha presentado al usuario durante la resolución del ejercicio.

4. Conclusiones.

Se ha analizado un sistema difuso del tipo Sugeno que estima satisfactoriamente la dificultad que se le presenta a los estudiantes a la hora de resolver palabras en el juego de sopa de letras. Lo anterior terminó en el diseño de las entradas de las funciones de membresía triangulares que son “erroresortograficos” y “tiempodereaccion” que se encuentran representadas gráficamente en la figura 5 y figura 6. Para llegar a determinar la dificultad el proceso de las dos entradas requirió de una base de 9 reglas que se encuentran definidas en la tabla 1. Por consiguiente, se pudo determinar el grado de “dificultad” que se encuentra representada gráficamente en la figura 7. Lo anterior se implementó en un ambiente de desarrollo de Matlab que se pueden apreciar en las figuras 8 y 9. Para poder tener una base en la cual se verificó el caso de estudio presentado en las figuras 11, 12, y 13. Al fijar los datos de entrada, es decir, el número de errores y el número de segundos que un estudiante requiere para completar un intento en un juego móvil de sopa de letras. Este proceso de análisis de las respuestas que se está desarrollando en la app como se muestra en la figura 14. De esta manera, con los datos que el alumno va aportando por medio de la utilización de la app, se generará una retroalimentación al sistema, considerando que el sistema puede por defecto determinar el dominio que cada estudiante tiene en cada palabra.

Referencias

[1] Vernon, S. A.; Alvarado, M. El desarrollo de la acentuación gráfica en niños y jóvenes mexicanos. Revista Mexicana de Investigación Educativa. Consejo Mexicano de Investigación Educativa, A.C. México. vol. 18, núm. 56, enero-marzo. pp. 141-157. (2013).
[2] Cabral Sanguino, A. Manual didáctico de ortografía para educación secundaria. Fondo de editorial del magisterio del SNTE. México. (2017).
[3] Sotomayor, C; Molina, D; Bedwell, P; Hernández, C. Caracterización de problemas ortográficos recurrentes en alumnos de escuelas municipales chilenas de 3º, 5º y 7º básico. Revista Signos. Estudios de Lingüística. Vol.46 Núm.81 Pp.105-131. (2013).
[4] Sotomayor, C; Natalia Ávila, N; Bedwell, P; Domínguez, A; Gómez, G; Jeldres, E. Desempeño ortográfico de estudiantes chilenos: claves para la enseñanza de la ortografía. Estudios Pedagógicos XLIII, Núm. 2. Pp.315-332. (2017).
[5] Fernández-Rufete Navarro, A. Enseñanza de la ortografía, tratamiento didáctico y consideraciones de los docentes de Educación Primaria de la provincia de Almería. Investigaciones sobre Lectura. Asociación Española de Comprensión Lectora. Núm. 4. Pp. 7-24. (2015).
[6] Moreno Camacho, M. A; Gómez Gallego, J. J. Sujeto, conocimiento y verdad. Revista CS. Psicología, epistemología y sociedad. Núm.25. Pp. 31-50. (2018).
[7] Segarra Ciprés, M; Bou Llusar J. C. Concepto, tipos y dimensiones del conocimiento: configuración del conocimiento estratégico. Revista de economía y empresa. Vol. 22. Núm. 52. Pp. 175-196. (2005).
[8] González Ramos, H. Percepción del movimiento: estudio psicofísico y electroencefalográfico. Facultad de ciencias Universidad de la República. Uruguay. (2014).
[9] Pérez-Tejero, J.; Soto-Rey, J.; Rojo-González, J. J. Estudio del tiempo de reacción ante estímulos sonoros y visuales. Motricidad. European Journal of Human Movement. Asociación Española de Ciencias del Deporte Cáceres. Vol. 27. Pp. 149-162. (2011).
[10] Espinal Pérez, C. E. (2012). Percepción, movimiento y lenguaje: claves de lo humano. Una aproximación a la antropobiología y la pragmática filosófica de Arnold Gehlen. Universitas Philosophica. Vol. 29. Núm. 59. pp. 239-264.
[11] Camarero, F; Martin del Buey, F; Herrero, J. Estilos y estrategias de aprendizaje en estudiantes universitarios. Revista Psicothema 2000. Vol. 12. Núm. 4. Pp. 615-622. (2000).
[12] Valencia Gutiérrez, M. C.; Ávila Peraza, P. F.; López Méndez, M. R.; García Ramírez, M. J. Estilos de aprendizaje Vak y honey-alonso de los Estudiantes de químico farmacéutico biólogo de la Universidad Autónoma de Campeche. Revista boletín Redipe. Vol. 9. Núm. 2. Pp. 132-139. (2020).
[13] González Morcillo, C. Lógica difusa una introducción práctica. Universidad Tecnológica de la Mixteca. (2022).
[14] Morales-Luna, G. Introducción a la lógica difusa. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN. pp 1-12. (2002).
[15] Ruvalcaba Coyaso, F. J; Vermonden, A. Lógica difusa para la toma de decisiones y la selección de personal. Universidad & Empresa. Vol. 17. Núm.29. Pp. 239-256. (2015).
[16] Vicent Salvador, I. Conjuntos difusos: aplicación al control de procesos. Universitat Jaume I. (2014).
[17] Diciembre Sanahuja, S. Sistemas de Control con Lógica Difusa: Métodos de Mamdani y de Takagi-Sugeno-Kang (TSK). Universitat Jaume I. (2017).
[18] Pressman, R. S. Ingeniería del software. Un enfoque práctico. Mc Graw Hill. Mexico. 2 E. (2002).
[19] Arbeláez S., O.; Medina A., F.A.; Chaves O., J. A. Herramientas para el desarrollo rápido de aplicaciones web. Scientia Et Technica, Vol. XVII, Núm. 47. Pp. 254-258. (2011).
[20] Kuri Casco, S. A; Reyes Vergara, M. L. La evaluación del aprendizaje: entre las evidencias de desempeño y los conocimientos. Revista de artes, Humanidades y ciencias sociales. A & H. Vol. 7. Núm. 12. Pp. 63-77. (2020).
[21] González Gómez, Y. E; Mendoza Pérez, M. A; Martínez Reyes, M. Reinvención del juego sopa de letras en un software beta para la ortografía española. Talento humano y gestión escolar. Rilco. Pp. 135-148. México. (2022).

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 13, pp. 166 – 177
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Sistema de Control de Equipos de Laboratorio (SCEL)

Mirelez Delgado Flabio Dario[1], Hernández González Umanel Azazael[1], López Serrano Irma Yvette[1], Cruz Leija Roberto Oswaldo, Mena Zamora Jazmín Abigail[1], Muñoz Moreno Fátima del Rosario[1]

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

Resumen

Este proyecto consiste en un desarrollo de un sistema en el que los encargados de los laboratorios de las universidades puedan llevar la gestión de manera semiautomática, realizar una calendarización del mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos, y al mismo tiempo sea capaz de facilitar el préstamo de los equipos a los estudiantes y así reducir el tiempo de recepción y entrega. Actualmente, existen laboratorios en donde los inventarios se generan de forma manual, por lo que es difícil conocer la situación de los equipos, si faltan o sobran, y esto ocasiona que pueda tener equipo dañado sin que el personal encargado se percate. Para el préstamo a los alumnos se desea ahorrar tiempo de recepción-entrega para que puedan aprovechar mejor sus prácticas y proyectos, por lo que el sistema simplificará la entrega y recepción de equipos durante las prácticas.

Palabras clave: Gestión semiautomática, Préstamo, Arquitectura cliente-servidor

1. Introducción

La informática ha ayudado en la implementación de soluciones para la gestión de mantenimiento de equipos, facilitando la realización de tareas y reduciendo los costes de forma considerable. El avance de la tecnología ha hecho que se puedan realizar más cosas, pero también que se dependa de ella. En la mayoría de las instituciones educativas, el equipo con el que se cuenta en los laboratorios suele ser costoso y difícil de mantener. El llevar un registro adecuado para ello suele ser de vital importancia, ya que se puede saber las condiciones del equipo, el uso que se le dio, cuándo requiere mantenimiento, etc [1]. Este tipo de información genera una gran cantidad de registros para los usuarios que hacen uso de los laboratorios y hace que se dificulte el acceso a la información para mejorar procesos, controlar acciones y recursos, entre otros. Hoy en día se requieren procedimientos integrados a sistemas de información con el fin de gestionar y utilizar la información de todas las áreas y, por lo tanto, asegurar un buen comportamiento del proceso para hacer eficientes los tiempos [2].

El mantenimiento de distintos equipos ha tomado una mayor importancia en las compañías, ya sean privadas o públicas, donde buscan un beneficio en los costos, el servicio y la calidad. Por esta razón, se ha generado la necesidad de enlazar la gestión de mantenimiento con una herramienta informática que permita la planeación, ejecución y control de todas las acciones; donde arrojen datos que deben ser transformados en información para generar beneficios para la productividad y competitividad de las empresas al facilitar la toma de decisiones respecto a cada área [1].

Por otro lado, la información que se obtiene de estas bases de datos rara vez se suele gestionar, de forma que se conozca quién la ha generado, donde se va a almacenar y a quien le puede resultar útil, lo cual implica que con frecuencia se “reinvente la rueda” y no se aproveche el “capital intelectual” [2].

En las últimas dos décadas se ha visto un crecimiento en el desarrollo de software. Lo que ha ocasionado que el trabajo de profesionistas e investigadores se enfoque y se vea favorecido por software que permita el control y mantenimiento [3]. Los softwares de mantenimiento son ampliamente reconocidos como un factor dominante en las distintas empresas [4].

En distintas instituciones dentro de los laboratorios, se cuenta con una gran cantidad de equipo que se emplea para prácticas, trabajos y proyectos de investigación. Este equipamiento suele ser usado gran parte del día a día. Para tener un control del manejo de los equipos se suelen emplear bitácoras, en donde los usuarios registran sus datos de manera manual. Debido a esto se genera una cantidad considerable de información, la cual resulta difícil o hasta imposible de revisar cuando se requiere una consulta de los registros.

Por otro lado, al realizarse todo el control del equipamiento de manera manual, resulta imposible poder establecer un correcto plan de mantenimiento, generando problemas como una correcta programación, falta de insumos, equipos sin realizar mantenimiento, equipo con mantenimiento repetido, entre otros.

Debido a las situaciones antes mencionadas se propone el desarrollo de un software que cuente con una base de datos del equipo del laboratorio (SCEL). En este sistema se permitirá dar de alta, baja, realizar anotaciones y calendarización del mantenimiento de los equipos. Para un mejor uso estará conectado a internet para poder acceder por parte del personal a cargo en cualquier momento. Por otro lado, los usuarios por medio de su número de boleta o número de empleado podrán realizar el registro y solicitud del equipo para sus prácticas y proyectos. Este sistema es una aplicación web donde podrán registrar el equipo que los usuarios requieren para sus prácticas y proyectos. De esta manera se disminuirán tiempos a la hora del registro y se podrá aprovechar mejor las horas de trabajo de los laboratorios.

Existen algunos softwares en el mercado, como lo son: Oddo, Linkaform, MP_ver8, GMAO, Bind erp. Estos son útiles y se les puede encontrar ventajas y desventajas; en el software Lotome se tiene la ventaja de que el precio es muy accesible y solo cuenta con un tipo de usuario que es administrador; por otro lado, una desventaja seria que este programa se encuentra únicamente en inglés por lo que podría ser tedioso para el encargado. Linkform: Una de sus principales ventajas es que digitaliza las bitácoras de accesos, obtiene reportes comparativos de equipos y lanza alertas de consumo en uso o fallos y los asigna automáticamente. MPsoftware: La desventaja principal es que su costo es demasiado elevado; la ventaja de este software es que planifica y optimiza la gestión de inventarios de manera más sencilla. GMAO: Una ventaja es que lleva el control y mantenimiento gestionando el inventario y permite la visualización de los calendarios de trabajo, la desventaja es que es costoso y entre más usuarios lo tengan se eleva más su precio. Bind erp: La ventaja es que se localiza en la nube lo cual permite tener el control de los inventarios desde cualquier lugar. La desventaja es que el plan básico es elevado. Odoo: las ventajas es que es un software más enfocado para PYMES, es de código abierto y se puede personalizar la desventaja es que como los otros softwares su precio es elevado. Por lo que en SCEL se pretende juntar las ventajas de los anteriores y adaptarlo para que su uso sea de mayor eficiencia.

2. Metodología

Para este trabajo, se desarrolló una Aplicación Web, la cual se alimenta de una base de datos en donde se realizan altas y bajas, y se pueden elaborar anotaciones, generar datos estadísticos y realizar la programación del mantenimiento de los equipos. Cada equipo que se encuentra en el laboratorio es identificado con un número de control único, el cual permite a los responsables realizar y consultar los registros, anotaciones y anomalías encontradas. Para el desarrollo de este sistema se decidió emplear la metodología en cascada.

El registro de los usuarios se realiza mediante el número de boleta o número de empleado, de esta forma toda la comunidad que requiera el servicio de los laboratorios puede tener acceso al sistema.

Una vez que el usuario es identificado, éste puede seleccionar los equipos que desea utilizar y la mesa en la que va a trabajar, así se pueden obtener reportes de cada uno de los equipos, generando la optimización de la administración y el control de cada uno de ellos. En la figura 1 se muestra un diagrama que representa de manera general, la funciones y características que tendrá el sistema según los requerimientos definidos.

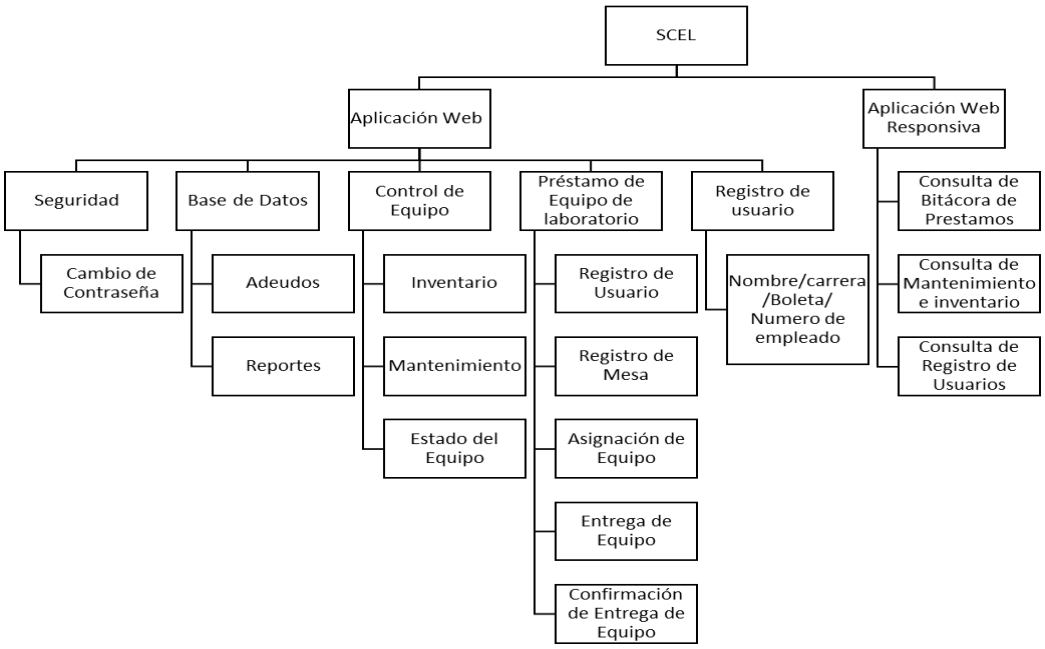


Figura 1. Diagrama conceptual del sistema.

Para llevar a cabo el diseño del sistema se pasó por diferentes etapas: los requerimientos funcionales y no funcionales, la arquitectura del sistema, la base de datos, diagrama entidad-relación y diagrama de clases.

2.1 Requerimientos del sistema

El proyecto “Sistema de Control de Equipo de Laboratorio” (SCEL), propone implementar una herramienta tecnológica que ayude a la agilización en el laboratorio de electrónica de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas (UPIIZ), generando registros digitales, que contemplen a los usuarios, los equipos de laboratorio de electrónica, el mantenimiento preventivo y correctivo de estos mismos; permitiendo el préstamo de material a los alumnos con el fin de agilizar tiempo en la recepción y entrega. El sistema se desarrolla usando las tecnologías de html, css, javascript, php y Ajax lo que permite tener una mayor estabilidad y mejora de los datos.

El sistema podrá:

- Tener dos tipos de usuarios: administrador y usuario.
- Generar el registro de los alumnos mediante el número de boleta y de los docentes, técnicos y administrativos mediante su número de empleado.
- Organizar el registro para el control del inventario de los equipos de electrónica.
- Calendarizar y controlar el registro mantenimiento preventivo y realizar el registro del mantenimiento correctivo de los equipos del laboratorio.
- Sistematizar el préstamo de material a los alumnos con el fin de agilizar tiempos.

El sistema no podrá:

- Realizar de manera autónoma la administración del equipo.
- Ser modificado o alterado por cualquier persona.

En la tabla 1 se muestran los requerimientos funcionales del sistema.

Tabla 1. Requerimientos Funcionales del sistema**.**

ID Requerimiento	Descripción
RF_01	Se debe de generar un registro de usuarios que deseen solicitar un préstamo del equipo del laboratorio.
RF_02	Se deberá seleccionar un número de mesa para tener un control de cual está disponible y elegir una.
RF_03	El usuario podrá seleccionar un equipo de cada insumo del laboratorio con excepción tarjetas FPGA, DSP, DAQ debido a que en cada equipo varía su funcionamiento.
RF_04	Deberá tener un botón de entrega para realizar la entrega del equipo.
RF_05	El administrador deberá revisar el equipo que se encuentre en condiciones e ingresar al sistema con una clave única para finalizar el proceso.
RF_06	En caso de que pase una irregularidad con el equipo el usuario debe notificar al administrador, este pasará a la selección de inventario y hará el reporte necesario.
RF_07	Para el registro de usuarios es necesario, nombre completo, numero de boleta/ número de empleado, carrera o área y fotografía.
RF_08	Realizar una bitácora de los equipos especificando su nombre, número de serie, marca, número de control interno, estado, localización y características.
RF_09	Realizar calendarios del mantenimiento correctivo y la agenda para mantenimiento preventivo.
RF_10	Realizar respaldo de la base de datos en el disco duro de la computadora en donde estará alojado el sistema.
RF_11	Se deberá de relacionar la información sobre un adeudo o equipo dañado con un usuario.
RF_12	Se podrá visualizar el estado de cada equipo y/o material de laboratorio, si está dañado o en préstamo (aparecerá como no disponible).

En la tabla 2 se muestran los requerimientos no funcionales del sistema.

Tabla 2. Requerimientos No Funcionales del sistema**.**

ID Identificador	Descripción
RNF_01	Cuando se abra el sistema web en dispositivo móvil tendrá una sección para el registro de bitácora.
RNF_02	Cuando se abra el sistema web en dispositivo móvil tendrá una sección para el control del mantenimiento e inventario de los equipos de laboratorio.
RNF_03	Cuando se abra el sistema web en dispositivo móvil tendrá una sección para el registro de los usuarios.
RNF_04	El sistema debe ser confiable y estar disponible en todo momento.
RNF_05	El sistema debe ser fácil de usar y comprensible para los usuarios, incluso aquellos que no tienen experiencia técnica.
RNF_06	El sistema debe tener una documentación clara y completa para facilitar su uso y mantenimiento.

2.2 Arquitectura del sistema

Los componentes forman la arquitectura del software y, en consecuencia, juegan un papel en el logro de los objetivos y de los requerimientos del sistema que se va a construir [5]. Para este sistema a

desarrollar se emplea una arquitectura cliente-servidor de tres niveles (figura 2), debido a que el proyecto contempla tres fases que son: “nivel de presentación”, “nivel de aplicación” y “nivel de datos”.

- El “nivel de presentación” es la interfaz gráfica de usuario y la comunicación entre el usuario y el sistema.
- El “nivel de aplicación” es la parte lógica del sistema y la capa intermediaria que procesa información que se recopiló de la fase de “nivel de presentación” y de “nivel de datos”.
- El “nivel de datos” es el nivel de base de datos, donde se almacenan y gestiona la información procesada del sistema.

La arquitectura de tres niveles tiene que pasar por un nivel de aplicación. Los niveles de presentación y datos no se pueden comunicar entre sí.

Figura 2. Arquitectura cliente-servidor de tres capas.

El Diagrama de componentes es un diagrama que permite visualizar la estructura de alto nivel del sistema y el comportamiento del servicio que estos componentes proporcionan y usan a través de interfaces. [6]. Se realizó un diagrama de componentes para visualizar la organización y relaciones de dependencia que existe en cada componente del sistema, además de proporcionar una visión de alto nivel. En la figura 3 se puede observar los componentes del sistema, los cuales se agruparon en “Base de datos” e “Interfaz Web”. El primero consiste en los datos registrados en el sistema, que los usuarios interactúan por medio de la presentación gráfica (Interfaz de usuario). El segundo grupo consiste en los componentes donde se realizan las operaciones necesarias para que el sistema cumpla con las funciones que debe desempeñar.

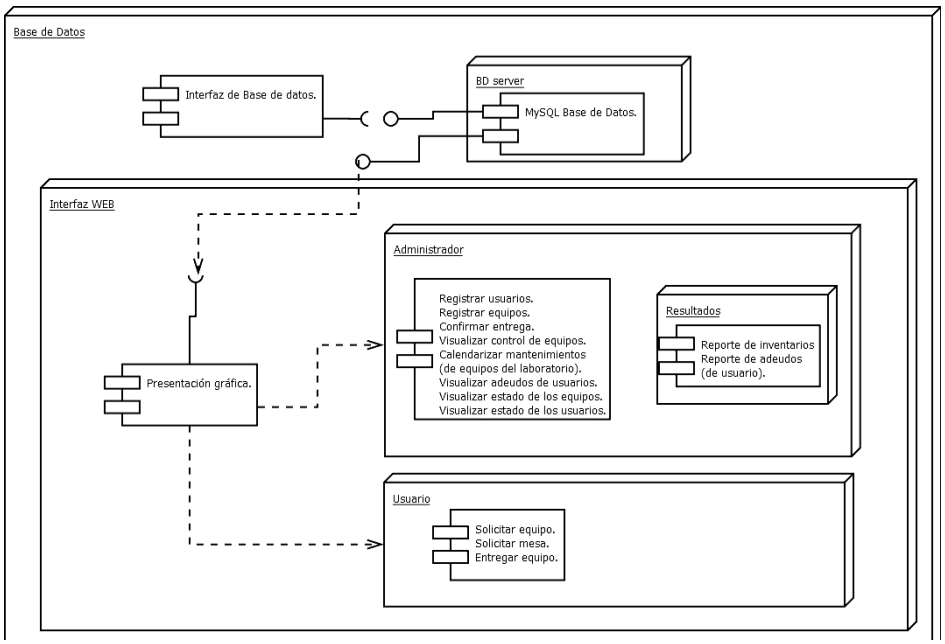


Figura 3. Diagrama de componentes del sistema.

La “Interfaz web” agrupa a los siguientes componentes:

Presentación Gráfica: Componente que permite a los distintos tipos de usuario interactuar con el sistema. En este componente dependiendo si es un usuario o administrador permite visualizar distintas opciones.

Administrador: Es el componente que permite realizar el registro de usuarios y equipos; además puede realizarla confirmación de entrega y visualización del control de equipos, adeudos de usuarios y estados de los equipos, así como la calendarización del mantenimiento. Finalmente, este componente permite realizar el reporte de adeudos e inventarios.

Usuario: Este componente permite realizar la solicitud de equipo y mesa, y realizar la entrega de equipo.

2.3 Base de Datos

La selección de la base de datos depende de los requisitos del sistema. Una base de datos relacional es un tipo de base de datos que almacena y proporciona acceso a puntos de datos relacionados entre sí [7]. Debido a la complejidad del proyecto se decidió usar una base de datos relacional, ya que los datos están enlazados entre sí y no son excesivos. En la figura 4 se muestra el diseño que se implementó en la base de datos. Para la base se contemplaron 8 tablas: usuario, revisión adeudos usuario, equipo, préstamo, administrador, registro adeudos, reportes y mantenimiento.

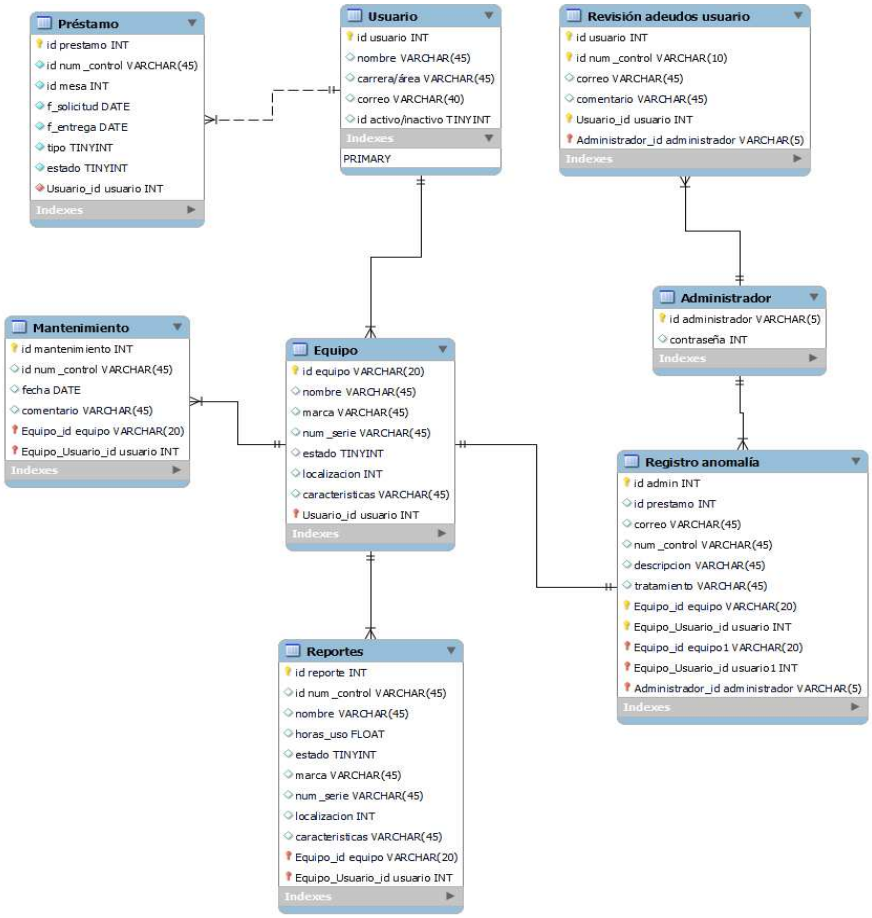


Figura 4. Base de datos del sistema.

2.4 Diagrama Entidad-Relación

El Diagrama Entidad-Relación, también conocido como modelo entidad relación o ERD, es un tipo de diagrama de flujo que ilustra cómo las "entidades", como personas, objetos o conceptos, se relacionan entre sí dentro de un sistema. Los diagramas ERD son usados a menudo para diseñar o depurar bases de datos relacionales en los campos de ingeniería de software, sistemas de información empresarial, educación e investigación [8]. En el sistema de control de equipos de laboratorio (SCEL) se utiliza el diagrama ER como una representación de la base de datos y de cómo se mantendrán los registros de los actores que contendrá nuestro sistema (figura 5).

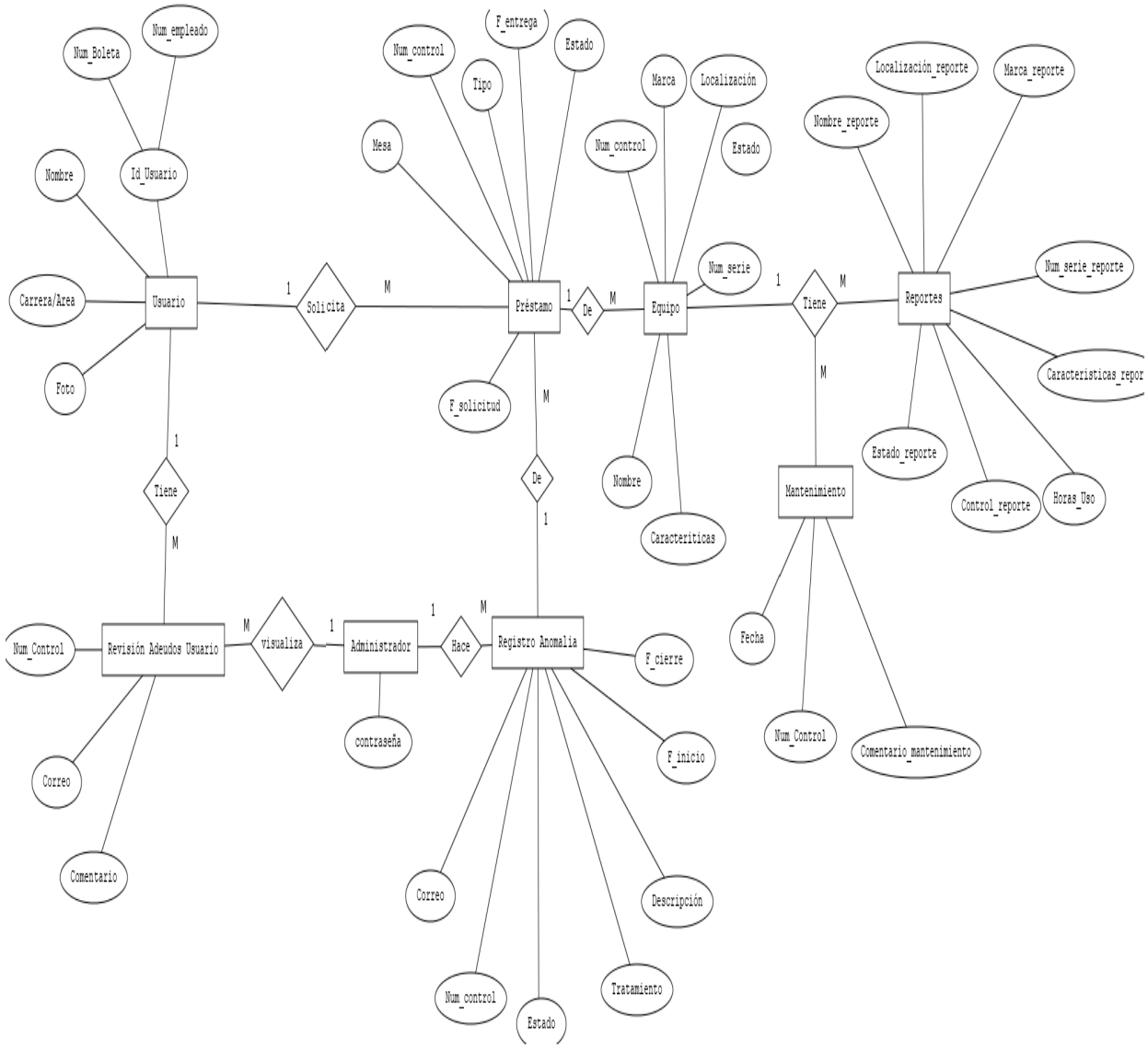


Figura 5. Diagrama de Entidad-Relación del sistema.

2.5 Diagrama de clases

El Diagrama de clases representa los propósitos fundamentales de UML porque separa los elementos de diseño de la codificación del sistema. Dado que las clases son el bloque de construcción

de los objetos, los diagramas de clase son los bloques de construcción de UML [9]. En la figura 6 se muestra el diagrama de clases del sistema, el cual permite visualizar las relaciones que existen entre objetos. Además de indicar los atributos y operaciones identificadas para cada clase.

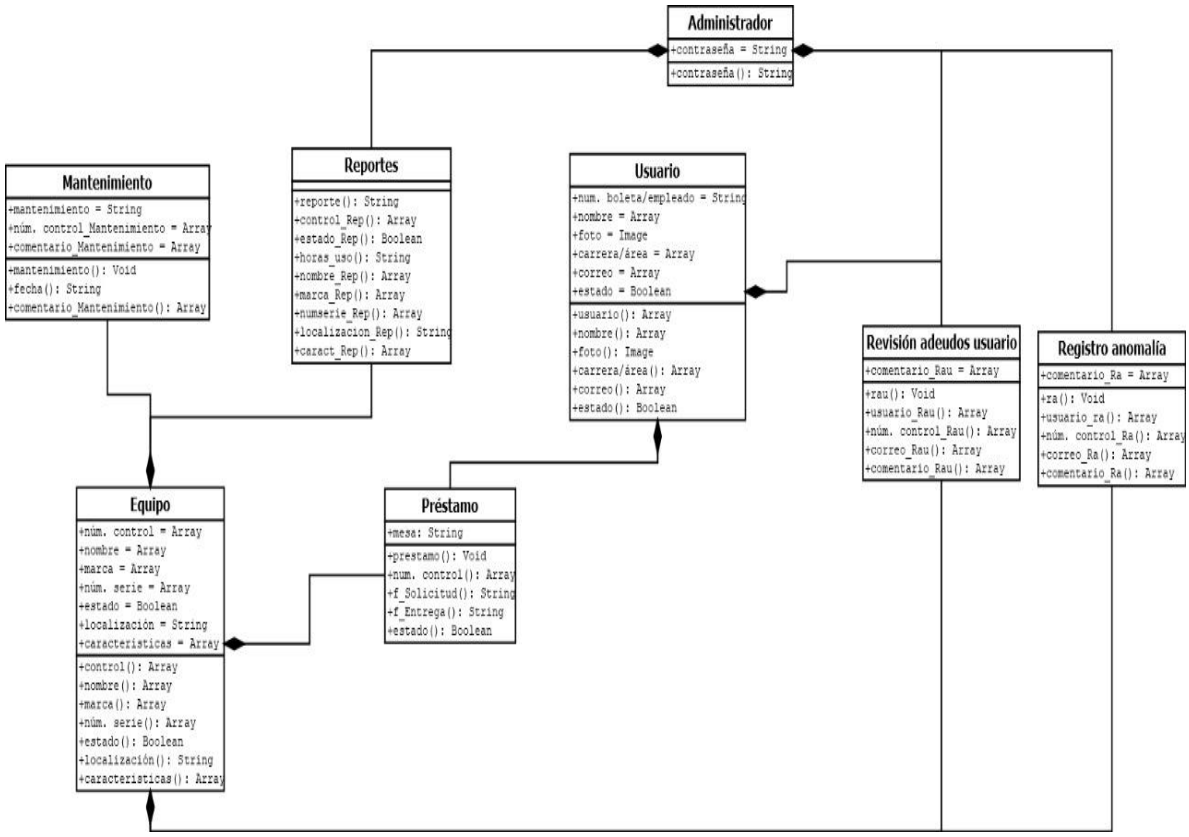


Figura 6. Diagrama de clases del sistema.

3. Resultados

Para la implementación del sistema se desarrolló una aplicación web, en donde se emplean diferentes pantallas para que los usuarios interactúen y tengan un mejor control del manejo de los equipos en los laboratorios. En la figura 6a se puede observar la pantalla de inicio, donde se muestra el Login; en esta pantalla los usuarios podrán ingresar al sistema dependiendo del tipo de usuario. Al ingresar como Usuario para solicitar o entregar un equipo, será necesario escribir el número de boleta o número de empleado; así el usuario puede solicitar o entregar equipo. (figura 6b). Para iniciar el sistema como administrador, se desarrolló la pantalla de la figura 6c, donde se ingresa una contraseña única, así el administrador puede dar de alta y baja tanto a equipos como usuarios.

En la figura 7, se observa la pantalla del apartado de Selección de Equipos, en donde los usuarios podrán solicitar el equipo básico, tarjetas, herramientas y pinzas que utilizarán durante sus prácticas o proyectos.

En la figura 8a se muestra la pantalla emergente para dar de alta al usuario (agregar), esta sección solo se puede realizar por un administrador. Se requiere llenar los campos con la información del usuario como su número de boleta o empleado, su nombre completo, su carrera o área y correo institucional. En la figura 8b se muestra la pantalla emergente para dar de alta equipos, esta sección solo es visible para el administrador. En esta pantalla se llenan los campos con la información del equipo

como su número de control, nombre del equipo, número de serie, marca, localización dentro del laboratorio, estado y sus características.

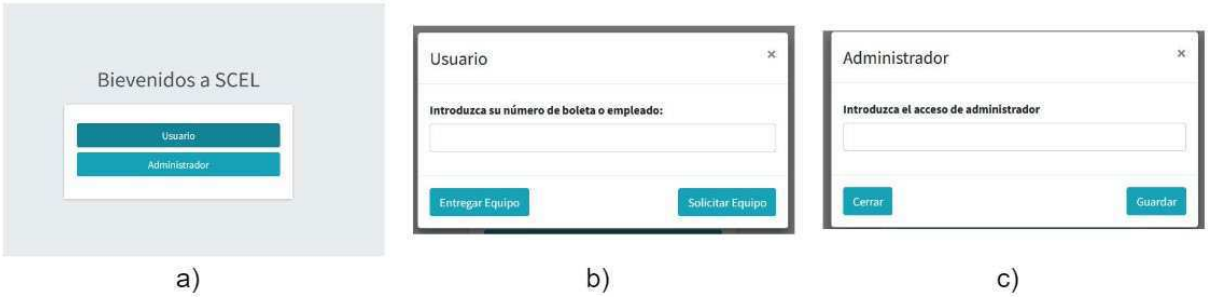


Figura 6. Pantalla de inicio. a) Principal. b) Usuario. c) Administrador.

Figura 7. Pantalla de usuario para selección de equipo.

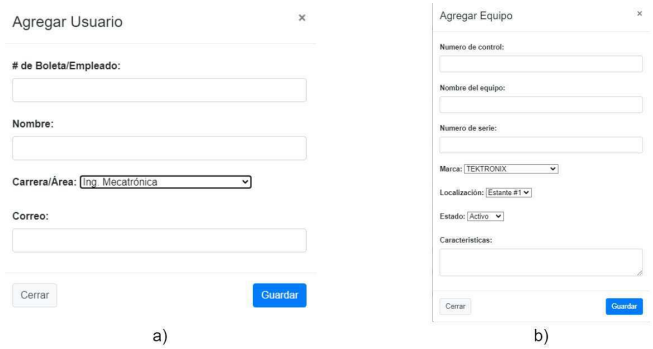


Figura 8. Pantalla de administrador. a) Agregar usuarios al sistema. b) Agregar equipos al sistema.

En la figura 9 se muestra el ejemplo de una solicitud de equipo de un Usuario. En esta sección del proyecto el Usuario puede ver si lo que solicitó es correcto con lo que se está entregando y al mismo tiempo el Administrador puede ver si el equipo se encuentra en buenas condiciones y reportar alguna anomalía para programar su mantenimiento correctivo.

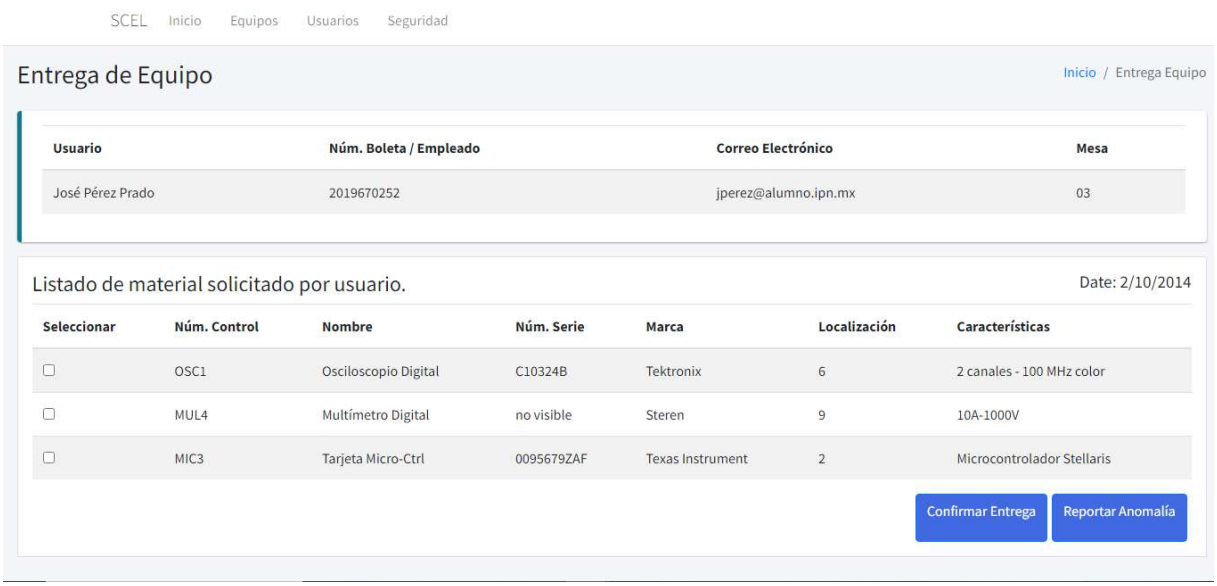


Figura 9. Diagrama de entrega de equipo.

En caso de reportar una anomalía en algun equipo se procede a realizar el reporte y su programación para el mantenimiento correctivo. De igual manera, se puede hacer la programación del mantenimiento preventivo para así tener un mejor control de los equipos y mantener los laboratorios en las mejores condiciones. En la figura 10 se muestra cómo se realiza un reporte de mantenimiento correctivo.

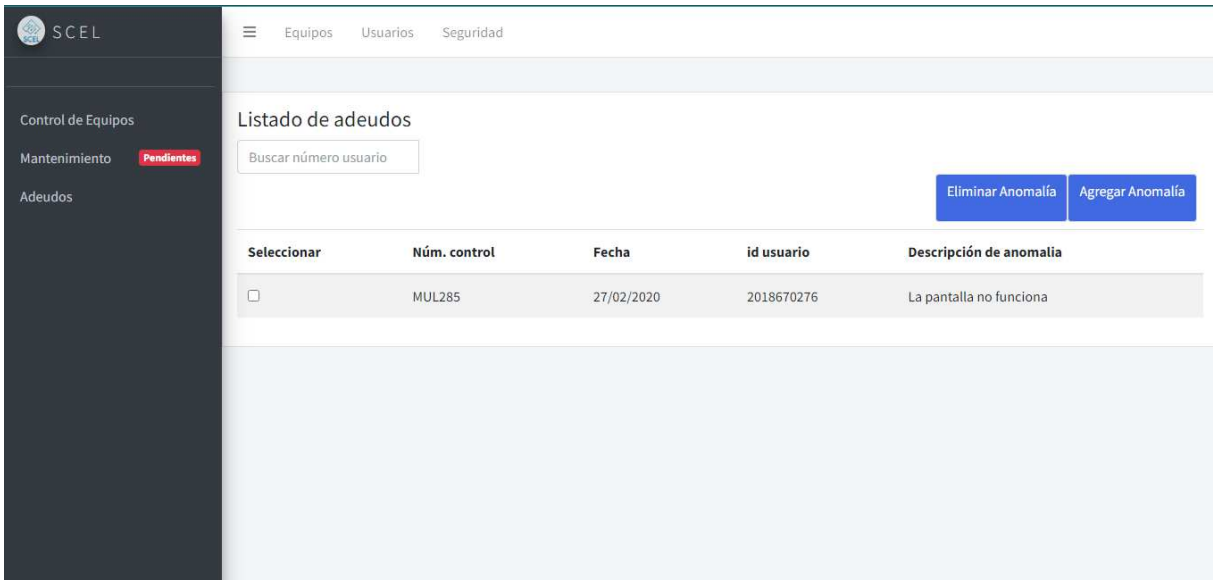


Figura 10. Pantalla de reportes para mantenimiento.

Se realiza un llenado del formulario para ingresar el reporte de la anomalía presentada después de la entrega del equipo que se encontró dañado. En la figura 11 se visualiza qué información se solicita para levantar el reporte.

Este sistema busca mejorar el manejo de los laboratorios en las diferentes instituciones para tener un mejor control de los equipos y poder realizar de mejor manera el mantenimiento preventivo y correctivo de los mismos.

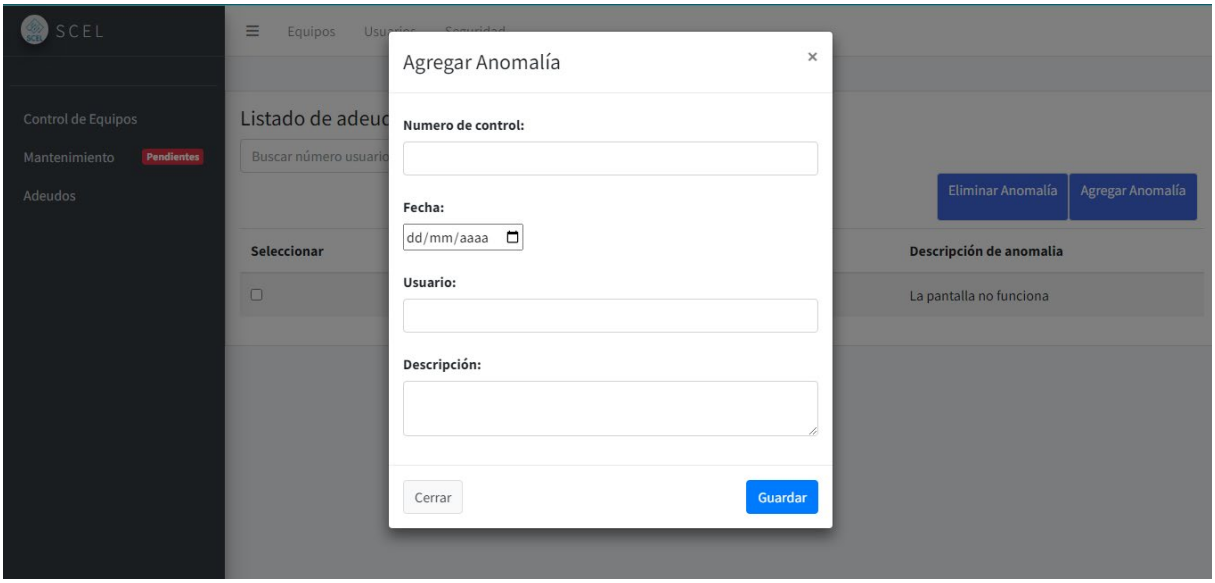


Figura 11: Formulario para ingresar el reporte de mantenimiento.

4. Conclusiones

Se realizó un sistema que permita automatizar la entrega y recepción de equipos de laboratorio y al mismo tiempo la programación y ejecución del mantenimiento correctivo y preventivo. Al contar con un sistema que automatice ciertas tareas, se pueden reducir los errores humanos y aumentar la precisión y fiabilidad de la gestión de los equipos. También el sistema puede permitir al administrador tener un mayor control y supervisión de los equipos, permitiendo reducir el tiempo y los recursos para mantener a los equipos en óptimas condiciones. La implementación del sistema en los laboratorios puede ayudar a prevenir el uso no autorizado de los equipos, lo que puede reducir el riesgo del mal uso de los mismos.

Debido al nivel de experiencia con el que se cuenta, la metodología en cascada resultó ser adecuada para el desarrollo del proyecto. Pues permitió contar con una estructura en las fases y actividades a lo largo del proyecto; y a pesar de que hubo cambios en las tareas definidas al comienzo, se generó la documentación necesaria para el análisis y diseño del sistema. Debido al análisis al realizar la toma de requerimientos, se descubrió que desarrollar una aplicación móvil y una de escritorio resultaba inviable, por lo que se optó por diseñar una aplicación web. Por lo que, se hizo una solicitud para cambiar los objetivos sin cambiar el alcance del proyecto

Se empleó una estructura de tres niveles ya que el sistema cuenta con una parte de administrador y otra de usuario, lo que permite tener un mejor control de los datos y de esta manera poder desarrollar una base de datos más amigable.

Las pantallas que se desarrollaron se desarrollaron de tal manera que sean amigables y fáciles de usar por los usuarios y así que cualquier persona pueda emplearlos.

Referencias

[1] M.I. Ardila-Marín, W. Orozco-Murillo, J. Galeano-Echeverri, A.M. Medina-Escobar, Desarrollo de software para la gestión del mantenimiento en los laboratorios de la I.U. Pascual Bravo, (n.d.).

[2] E. Vizcaíno, J. Pablo, Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial Asociación Española para la Inteligencia Artificial, (n.d.). http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=925031 10.
[3] N. Chapin, J.E. Hale, K.M. Khan, J.F. Ramil, W.-G. Tan, Journal Of Software Maintenance And Evolution: Research And Practice Types of software evolution and software maintenance, 2001.
[4] G. Canfora, A. Cimitile, Software Maintenance, in: 2001: pp. 91– 120. https://doi.org/10.1142/9789812389718_0005.
[5] R. Pressman, Ingeniería del software: Un enfoque práctico., 7th ed. McGraw Hill, 2010, pp. 137, 235.
[6] Diagramas de componentes de UML: Referencia," About Processes and Threads (Windows). . Available: https://msdn.microsoft.com/es-es/library/dd409390.aspx. [Accessed: Oct 13-2022
[7] M. Salama, A. Elkaseer, M. Saied, H. Ali, S. Scholz, Industrial internet of things solution for real-time monitoring of the additive manufacturing process, in: Adv. Intell. Syst. Comput., Springer Verlag, 2019: pp. 355–365.
[8] Lucidchart, Qué es un diagrama entidad-relación, Available : https://www.lucidchart.com /pages/es/qué-es-un-diagrama-entidad-relación. [Accessed: Oct 13-2022].
[9] Lucidchart, Diagrama de clase, Available: https://www.lucidchart.com/ pages/es/diagrama-de-clase. [Accessed: Oct 13-2022].
[10] J. David Vahos, A.A. Pino-Martínez, J. Jairo, C. Maldonado, Desarrollo de una herramienta de software para la gestión del mantenimiento de infraestructura en el SENA regional Antioquia Development of a software tool for the management of infrastructure maintenance in the SENA Antioquia regional, 2019.
[11] Mercedes. Marqués, Bases de datos., Universitat Jaume I. Servei de Comunicació i Publicacions, 2009.
[12] C. Belloch, Las Tecnologías de la Información y Comunicación en el aprendizaje, 2002.
[13] S. Pinzón y J. Guevara, "La gestión, los procesos y las metodologías de desarrollo de software," A c t u a l i d a d T e c n o l ó g i c a, vol. 2, p. 84, Jun. 2006.
[14] G. Guayta and L. Egas, "Evolución de las metodologías de desarrollo de la ingeniería de software en el proceso la ingeniería de sistemas software," pp. 3, 4.
[15] Maida, E. Gabriel, Pacienzia, and Julián, "Metodologías de desarrollo de software," Universidad Católica Argentina, 2015.
[16] M. Liviu, "Comparative Study On Software Development Methodologies," Academia, vol. 5, p. 41, 2014.
[17] H. Flórez, "Procesos de ingeniería de software," Vínculos, vol. 6, p. 27, Jul. 2013.
[18] J. Cervantes y M. Gómez, "Taxonomía de los modelos y metodologías de desarrollo de software más utilizados," Universidades, vol. 52, no. 0041-8935, p. 39, Mar. 2012..

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 14, pp. 178 – 190
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Modelo de orden reducido (ROM) en un motor de inducción magnética

Ibáñez Olvera Mario, Balderas Gutiérrez Juan Nabor, Jaramillo Sierra Bethsabet, González Pulido Axel

TecNM – Tecnológico de Estudio Superiores de Tianguistenco
mario_mecatronica@test.edu.mx

Resumen

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo principal, generar un modelo de orden reducido (MOR) a partir del diseño de un motor de inducción magnética. Este trabajo se realizó mediante el uso del software Ansys Electronics, el cual es un programa que posee la opción de trabajar mediante el uso del Método de Elementos Finitos (FEM), lo cual proporciona análisis y simulaciones con resultados más precisos y confiables ya que cuenta con la simulación mediante el análisis del elemento finito. Primero se diseñó el diseño 2D del motor de inducción en el módulo de Maxwell y usando la herramienta RMxprt se realizaron los parámetros de diseño de todos los componentes. Seguidamente se realizó un segundo diseño, pero en 3D esto para una mejor visualización del motor de inducción magnética. Una vez realizado el diseño y en base a este, se generó un Modelo de Orden Reducido (ROM) mediante la técnica de Extracción de Circuito Equivalente (ECE), usando principalmente dos modelos: Trifásico, y Rotativo. Finalmente, para corroborar los resultados, se realizaron las pruebas eléctricas del diseño 2D y de la ROM. Esto permitió modelar el comportamiento electrónico y mecánico del motor de inducción. Pudiendo observar que los resultados obtenidos por la ROM y los obtenidos por el diseño en Maxwell varían muy poco. Sin embargo, el usar la ROM trae consigo muchos beneficios en comparación a otras técnicas como lo es: la disminución de los tiempos y recursos en la simulación del motor.

Palabras clave: Simulación numérica, Motor de inducción, Diseño, Modelado 3D.

1. Introducción

Los motores eléctricos son cada vez más comunes para todas las personas. Se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde uso industrial general hasta uso doméstico, y aplicaciones de investigación remota en tierra, aire, agua y, finalmente, en el espacio, cada una con sus propias características únicas como su función y protección que estos brindan. Los motores eléctricos se utilizan en muchos campos, como robots móviles, brazos robóticos industriales, ascensores, grúas, equipos de perforación, vehículos eléctricos, drones u otras aplicaciones menos exigentes desde el punto de vista del control automático, como bombas, cintas transportadoras, etc.

Estas estadísticas también destacan los desafíos que enfrentan los fabricantes para mejorar la eficiencia del motor y reducir el consumo de energía. El diseño de motores eléctricos con la mayor eficiencia energética es fundamental, no solo para mantener la competitividad de los fabricantes, sino también para cumplir con las normativas cambiantes.

La necesidad de rendimiento, asequibilidad, eficiencia energética y conectividad impulsa la innovación en el diseño de motores eléctricos. Comenzando en 1834 con el primer motor eléctrico giratorio de Moritz Herrmann Von Jacobi [1], estas necesidades han evolucionado durante los últimos dos siglos, con inventos tempranos como baterías y electroimanes que permiten todo esto posible.

En 1866, la investigación del ingeniero alemán Werner von Siemens hizo posible producir motores eléctricos utilizando energía barata, y desde entonces comenzó a fabricar una variedad de motores de corriente continua (CC) para la industria y el transporte. Sin embargo, los motores de CC tienen varios problemas: son voluminosos, ruidosos y generan chispas cada vez que se cortocircuita el conmutador para invertir la dirección de la corriente [2]. Aquí es donde entra en juego el motor de corriente alterna (CA). En 1885, el ingeniero eléctrico Galileo Ferraris construyó un motor de CA de dos fases, pero el mal desempeño de la invención impidió su producción comercial. Lo mismo sucedió en 1887 cuando el inventor Nikola Tesla creó un motor eléctrico de dos fases con un rotor cortocircuitado incorporado.

Los motores eléctricos ahora se están desarrollando de manera flexible y para diversas aplicaciones especiales en la industria, las centrales eléctricas y el sector agroalimentario. El reto ahora es mejorar su eficiencia y aliviar el suministro eléctrico. Dependiendo de la aplicación, los costos de energía de los motores eléctricos están entre el 95% y el 97% de los costos totales de su ciclo de vida. Por lo tanto, no sorprende que los motores de baja eficiencia ofrezcan un retorno de la inversión limitado.

El uso de herramientas de software que usan métodos numéricos para calcular campos magnéticos y eléctricos se ha vuelto popular en el campo del diseño de máquinas eléctricas debido a la precisión mejorada en el diseño y análisis de máquinas eléctricas en comparación con los métodos analíticos convencionales. Permite una fácil verificación de los cálculos de diseño analítico, lo que facilita el análisis de problemas más complejos que involucran geometrías complejas, medios no lineales y más. Estos métodos incluyen una estimación más precisa de la distribución de los campos electromagnéticos en la estructura de la máquina mediante la resolución de las ecuaciones de Maxwell que rigen su comportamiento. Los principales métodos numéricos utilizados en el análisis de campo, mediante la resolución de ecuaciones diferenciales parciales, son: el método de las diferencias finitas (FMD), el método de los elementos finitos (Método de los elementos finitos, FEM) y el método de las diferencias de contorno (BEM) [3].

2. Desarrollo Experimental

Para poder llegar al producto final del trabajo, se tuvieron que realizar una serie de simulaciones en el software Ansys Electronics [4], con el fin de familiarizarse con la interfaz, las funciones y demás herramientas que este software nos ofrece. Además de retomar el principio de funcionamiento de los motores de inducción, que se basa en la generación de un campo magnético mediante un solenoide y cómo este campo puede inducir corriente en objetos ferrosos o magnéticos. Así mismo, el uso de la herramienta RMxprt para crear un modelo en Maxwell de una máquina síncrona de imán permanente [5].

2.1 Diseño de bobina tipo cilindro, inducida con corriente por medio de una superficie

En el presente modelado se simuló una bobina helicoidal, representada por un cilindro con un centro hueco. Esto con el fin de observar y analizar el campo generado por la bobina al ser inducida por una corriente eléctrica, así mismo, la interacción de dicho campo magnético con materiales ferrosos y magnéticos.

Un solenoide es una bobina conductora enrollada en forma de bobina helicoidal apretada de muchas vueltas. La corriente en este cable creará un fuerte campo magnético dentro de la bobina, mientras que el campo magnético externo es más débil y las líneas del campo magnético están más separadas. El campo magnético producido por el electroimán tiene líneas de fuerza internas (figura 1), que son perpendiculares al plano de la espira y se auto cierran [6].

En la primera etapa del proyecto, se procedió a construir la geometría de una bobina de tipo cilindro. Para ello, se extrajo un cilindro y se realizó un corte con otro cilindro de igual altura pero de menor diámetro, dando lugar a la forma deseada. Mientras que para la caracterización del material se abrió la ventana de propiedades del material y se procedió a configurar el material y color a un cobre

color naranja. Finalmente, una vez terminada la geometría se procedió a seccionar un lado de la figura, con el fin de poder aplicar la excitación de una corriente de 10 A (figura 2).

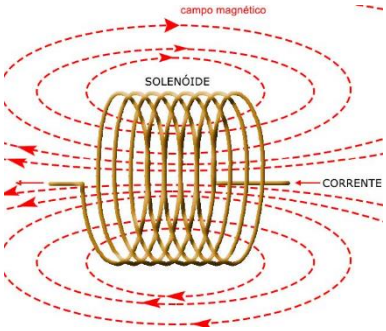


Figura 1. Campo magnético de solenoide.

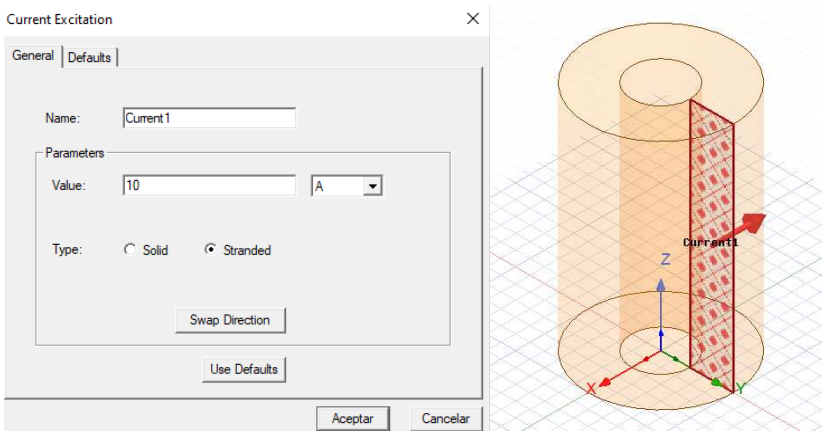


Figura 2. Excitación de la bobina mediante corriente.

2.2 Torque por interacción de campos magnéticos

El torque que se genera en los motores es necesario para su funcionamiento, por lo que en este apartado se presenta la interacción de un toroide y un imán permanente, con el fin de observar el torque producido por el campo magnético de ambos objetos. De manera similar al apartado anterior, forma parte de nuestros objetivos.

El toroide es un solenoide de N vueltas doblado alrededor de la circunferencia para que sus extremos converjan [7]. Por lo que calculamos el campo dentro y fuera del toroide evaluando cada parámetro de acuerdo con la ley de Ampere-Maxwell (1) sobre un círculo de radio r, para cada una de las variables (figura 3) .

$$\oint \quad \vec{B}.\vec{dl} = \mu_0 NI \tag{1}$$

Donde la integral del primer miembro es la circulación o integral de línea del campo magnético a lo largo de una trayectoria cerrada, y:

- μ_0 es la permeabilidad del vacío
- dl es un vector tangente a la trayectoria elegida en cada punto
- N que representa el número de vueltas que dará el cable a través del toroide

- I es la corriente neta que atraviesa la superficie delimitada por la trayectoria, y será positiva o negativa según el sentido con el que atraviese a la superficie.

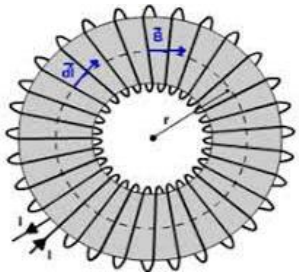


Figura 3. Toroide.

En la etapa de construcción de la geometría se realizaron 2 objetos: un toroide y un imán permanente hecho de NdFe35 (Material Ferromagnético) que posee propiedades necesarias para la simulación. Para la construcción del toroide se creó en base a un polígono de 12 lados el cual fue extruido por revolución sobre un eje del plano. Mientras que, por otro lado, para el imán permanente simplemente se extruyó un cuadrado ubicado en el centro del toroide. Para poder excitar la pieza mediante una corriente, primero se tuvo que seccionar el toroide sobre un plano. Seguidamente ya se procedió a aplicar una corriente de 100 A sobre la sección recién creada como se muestra en la figura 4.

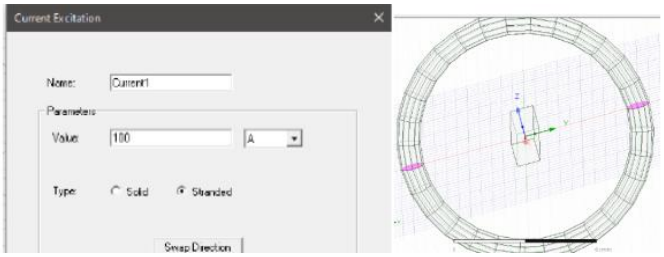


Figura 4. Excitación del toroide mediante corriente eléctrica.

2.3 Diseño 2D del motor de inducción

En este apartado se realizó el diseño 2D del motor utilizando la herramienta RMxprt. Dicha herramienta permite utilizar plantillas de diferentes máquinas eléctricas, sin embargo, para el caso particular de este trabajo se usó la de un motor de inducción magnética, configurando los parámetros dimensionales, eléctricos y mecánicos de cada uno de los componentes, tomando en cuenta las especificaciones de un motor de inducción estándar.

Primeramente, se abrió el software Ansys Electronics [8], y con ayuda de la herramienta RMxprt se creó una nueva plantilla de una Máquina Síncrona de Imán Permanente, dicha plantilla viene con valores preestablecidos, los cuales se cambiaron a los que se usaron en este trabajo, empezando con los parámetros generales del motor en la tabla 1.

Seguidamente se configurará el estator en el cual se ingresaron los siguientes parámetros (tabla 2). Una vez realizados nuestros parámetros designaremos otros aspectos para realizar la simulación correctamente, así como el material del cual está hecho el estator, a su vez también para las dimensiones de las ranuras del estator primero se desactivo Auto Design y se seleccionó Parallel Tooth para que puedan aparecer los demás parámetros y después cambiarles el valor.

Tabla 1. Configuración de las propiedades generales del motor.

Descripción	Valor
Tipo de máquina	Máquina síncrona de velocidad ajustable
Número de polos	6
Posición del rotor	Rotor interno
Pérdidas de fricción	15 W
Pérdida de viento	5 W
Velocidad de referencia	3600 rpm
Tipo de control	DC

Tabla 2. Configuración de propiedades del estator.

Descripción	Valor
Diámetro exterior	197 mm
Diámetro interior	111.8 mm
Longitud	100 mm
Factor de apilamiento	0.95
Tipo de acero	M19_24G
Número de ranuras	36

Para el solenoide del estator se ingresaron los siguientes parámetros y corroboro que las características del material de dicho componente fueran las correctas, así como los parámetros del rotor. Una vez configurado todos los parámetros, el diseño quedó como se muestra en la figura 5.

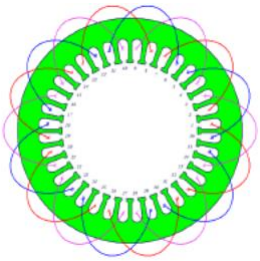


Figura 5. Diseño 2D del motor de inducción magnética.

Una vez configurados todos los componentes con RMxprt, se realizó una exportación del diseño 2D, posteriormente, se generó el mallado previo a la ejecución de la simulación. De igual forma se ingresaron los datos de configuración para el análisis de la simulación.

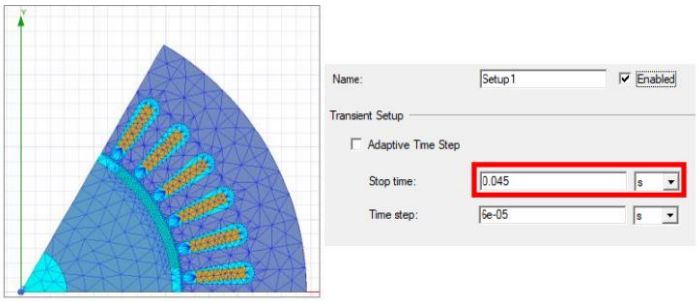


Figura 6. Mallado del modelo para la simulación.

2.4 Diseño 3D del motor de inducción

Una vez realizado el diseño en 2D y en base a este se diseñó el modelo 3D, para lo cual se configuró cada uno de los elementos del diseño (estator, rotor, jaula de ardilla, etc.). Posteriormente se insertó la geometría del estator, mediante las plantillas prediseñadas que ofrece la herramienta RMxprt. Posteriormente se configuraron los parámetros físicos del rotor, teniendo finalmente la siguiente pieza mostrada en la figura 7.

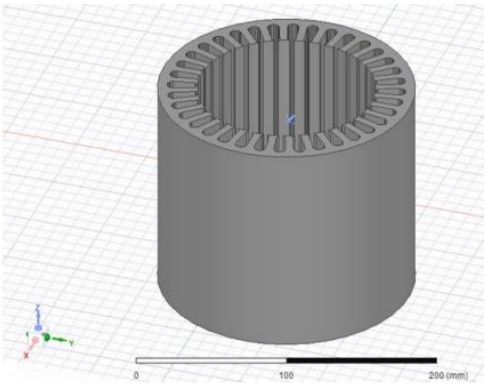


Figura 7. Visualización del Estator una vez configurado.

Se creó nuevamente la geometría del rotor mediante las plantillas de RMxprt, repitiendo el procedimiento realizado para el estator, pero modificando algunos parámetros. De igual forma se modificaron las propiedades, cambiándole el nombre a “Rotor” y dándole un color verde oscuro (figura 8).

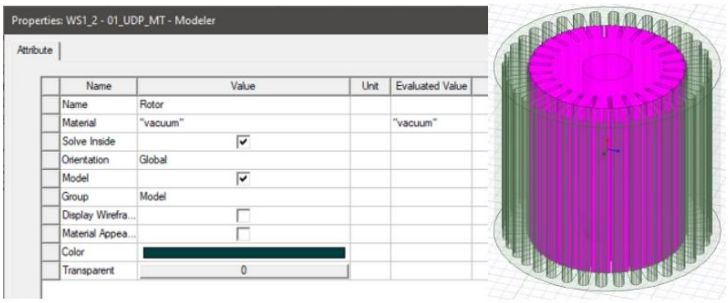


Figura 8. Caracterización de materiales para el rotor.

Después se procedió a crear la geometría de la jaula de ardilla del rotor, ingresando los mismos parámetros que con el Rotor. Modificando las propiedades de la jaula de ardilla, cambiándole el nombre a “Rotor_cage” y dándole un color verde agua (figura 9).

Para insertar el solenoide, se utilizaron los modelos que ofrecía el programa**, e**stableciendo la mayoría de las dimensiones idénticas a las de Stator. Seguidamente en la ventana de propiedades se le cambió el nombre a PhaseA_1 y dio un color amarillo (figura 10).

Para realizar los solenoides bastó con duplicar la que se hizo anteriormente, seleccionando los parámetros para la operación, como lo fueron 10 grados de separación y número de duplicados 3 como se muestra en la figura 11.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 14, pp. 178 – 190
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

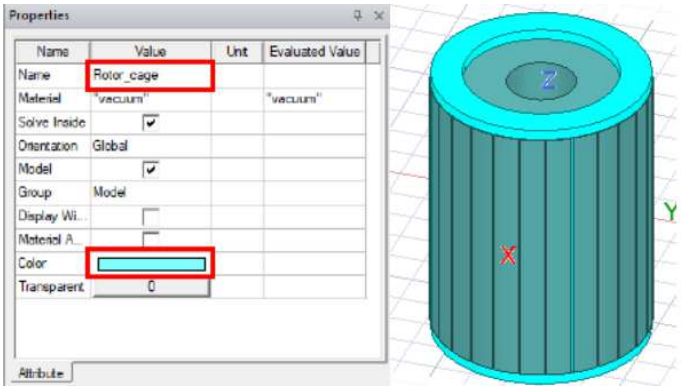


Figura 9. Caracterización de la jaula de ardilla.

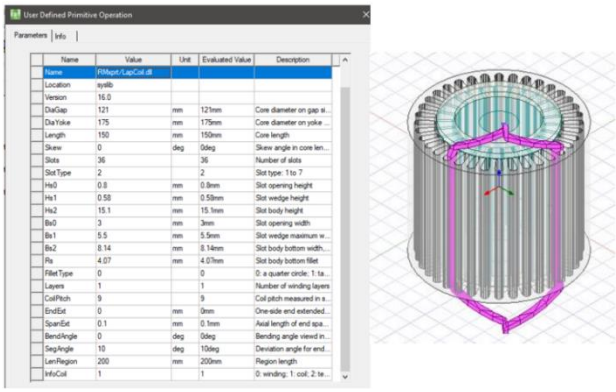


Figura 10. Configuración de parámetros del devanado.

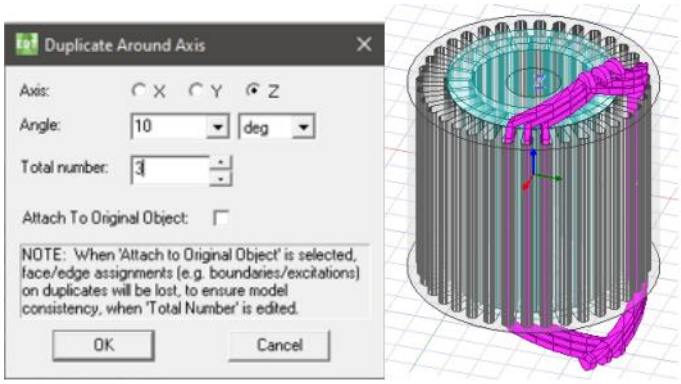


Figura 11. Duplicado del devanado para cada ranura del estator.

Se repitió el mismo procedimiento, pero seleccionando los 3 solenoides e ingresando un ángulo de separación de **60 grados** y número de repeticiones de **6**.

Finalmente se obtuvo el diseño 3d del motor de inducción, que a su vez nos muestra el área de análisis en el cual se va a centrar la simulación, como se muestra en la figura 12.

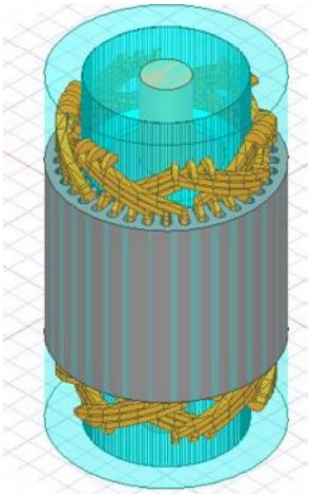


Figura 12. Diseño 3D del Motor de inducción magnética.

2.5 Generación de la ROM

Para la configuración de la ROM para el motor, mediante la técnica de Extracción de Circuito Equivalente [9], se realizó un nuevo proyecto, una vez abierto el archivo se configuró la fuente como externa para los 3 devanados (figura 13).

Figura 13. Fases de la corriente suministrada.

Posteriormente creamos un circuito nuevo, el cual servirá para realizar la simulación correspondiente en el programa el cual será un circuito que posea las 3 fases del motor (figura 14).

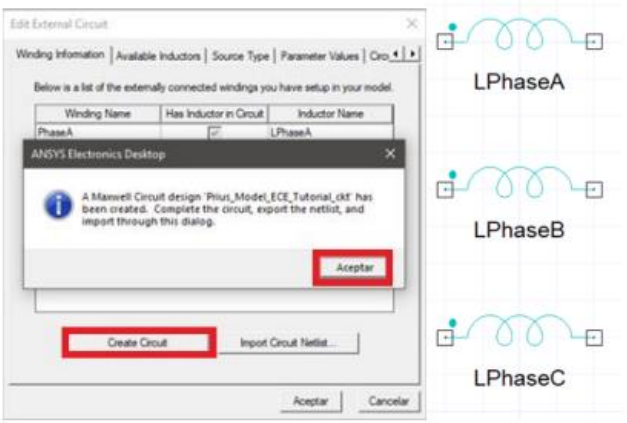


Figura 14. Extracción del circuito.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 14, pp. 178 – 190
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Después se seleccionaron los modelos con los cuales se trabajará en la simulación para proporcionar los datos requeridos para el análisis final, los cuales son motores de inducción tanto Trifásico como Rotacional (figura 15).

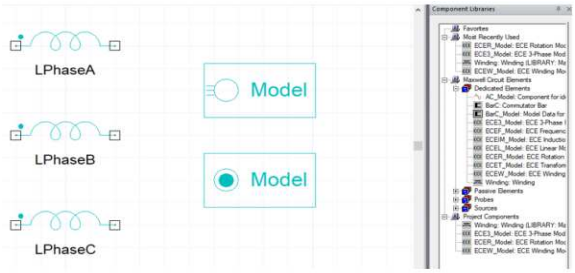


Figura 15. Modelos ECE Rotacional y Trifásico.

Se desactivaron los tres componentes del embobinado, ya que no se requerirán para la simulación, para posteriormente configurar el módulo ECE3 para las 3 fases (A, B y C), con una corriente de 30A 10, mientras que al módulo ECER se le ingreso un ángulo de rotación máxima de 15° y un número de polos de 8 para establecer los parámetros de la simulación (figura 16).

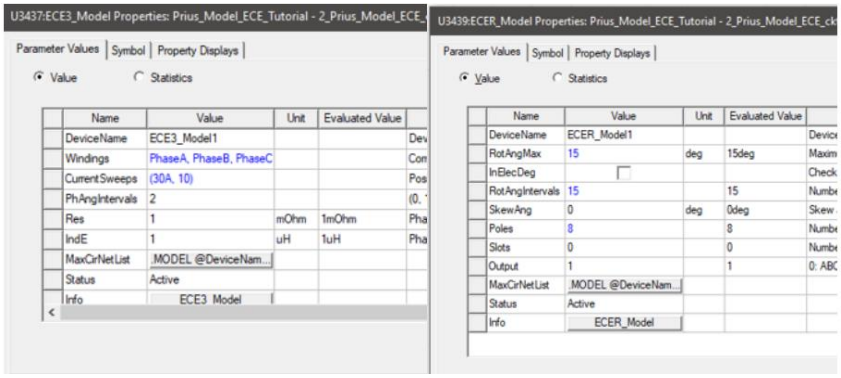


figura 16. Configuración de parámetros de los modelos ECE.

Finalmente, exportamos nuestro modelo de circuito a la simulación, que se encargó de realizar el conjunto de simulaciones definido en nuestro modelo. Luego, procedimos a simular nuestro modelo para validar los resultados y generar la ROM, donde podremos visualizar los aspectos del motor, tales como la corriente y el torque que este posee. (figura 17).

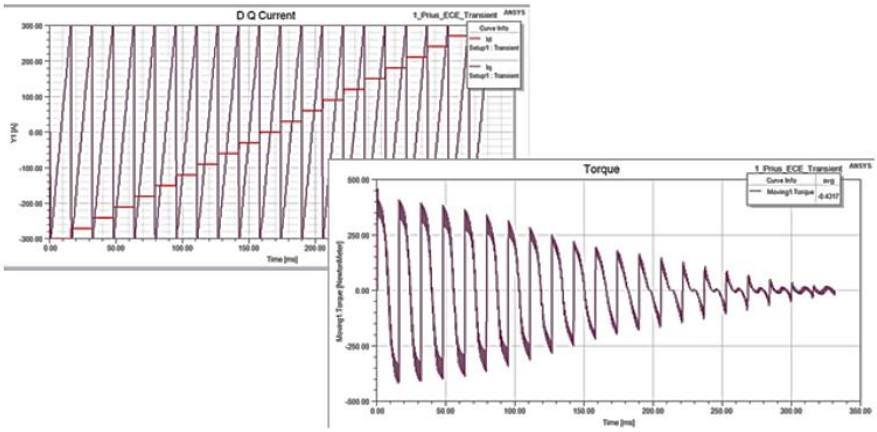


Figura 17. Simulación de la ROM.

Una vez generada la ROM, se realizaron las conexiones para la simulación (figura 18). Del lado izquierdo se tienen resistencias conectadas a las entradas A0, B0, C0, con un valor de $1\,\Omega$ esto para simular la entrada de la corriente trifásica del motor [10]. Por otro lado, se tiene V_ROT1 que simulara el torque del motor.

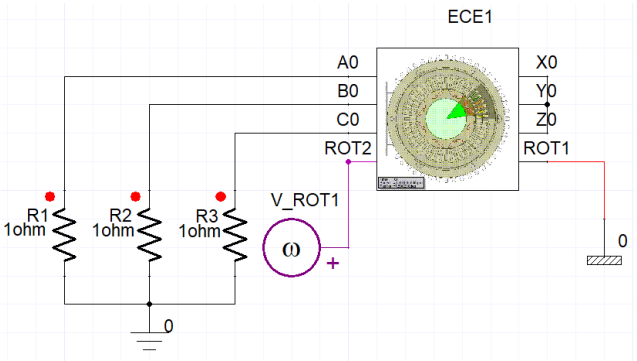


Figura 18. Modelo de Orden Reducido (ROM).

Finalmente, y previo al funcionamiento de la ROM se ingresaron los parámetros de simulación (figura 19).

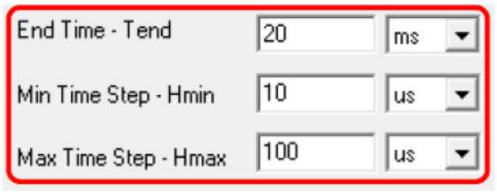


Figura 19. Parámetros de simulación de la ROM.

3 Resultados del funcionamiento de la ROM

El modelo matemático de orden reducido se puede obtener utilizando técnicas de reducción de orden. Estas técnicas se basan en la eliminación de algunas de las variables del sistema y la reducción del número de ecuaciones necesarias para describir el comportamiento del sistema. El modelo de orden reducido resultante es una aproximación del modelo completo, pero puede ser más fácil de analizar y simular. Los modelos de orden reducido se pueden expresar en forma matricial mediante ecuaciones diferenciales lineales. El modelo matemático generalmente se representa como:

$$dx/dt = Ax + Bu \tag{2}$$

$$y = Cx + Du \tag{3}$$

donde:

- x es el vector de estado del sistema
- u es el vector de entrada del sistema
- y es el vector de salida del sistema
- $A, B, C\ y\ D$ son matrices que describen las características del sistema

La matriz A es la matriz de estado, que describe cómo evoluciona el estado del sistema con el tiempo. La matriz B es la matriz de entrada, que describe cómo la entrada afecta al estado del sistema. La matriz C es la matriz de salida, que describe cómo se relaciona el estado del sistema con la salida.

La matriz D es la matriz de transmisión directa, que describe cómo la entrada afecta directamente a la salida. Tras verificar el correcto funcionamiento de la ROM en el módulo de Twin Builder, obtuvimos las gráficas de la simulación de la ROM que nos muestran tanto el comportamiento del torque (figura 20), como de las corrientes (figura 21) generados por el funcionamiento de la ROM.

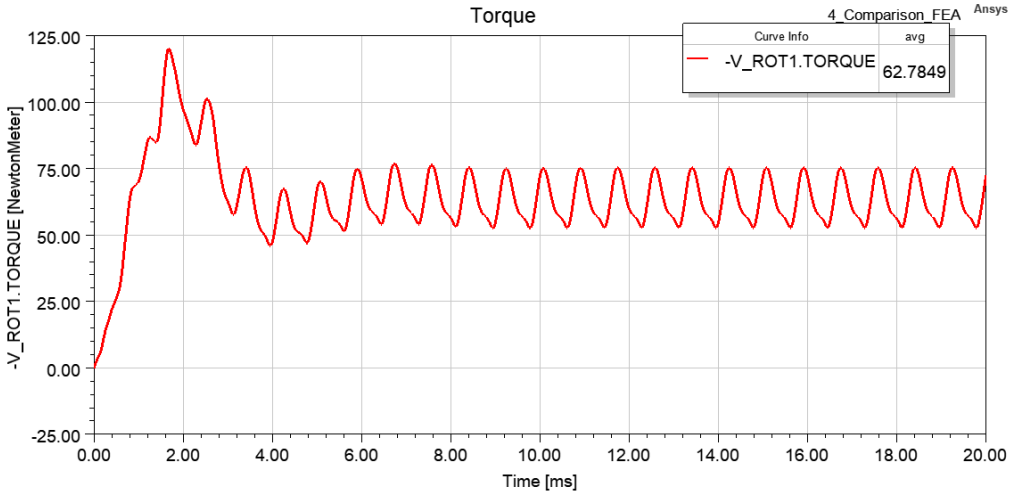


Figura 20. Resultados del torque generados con la ROM.

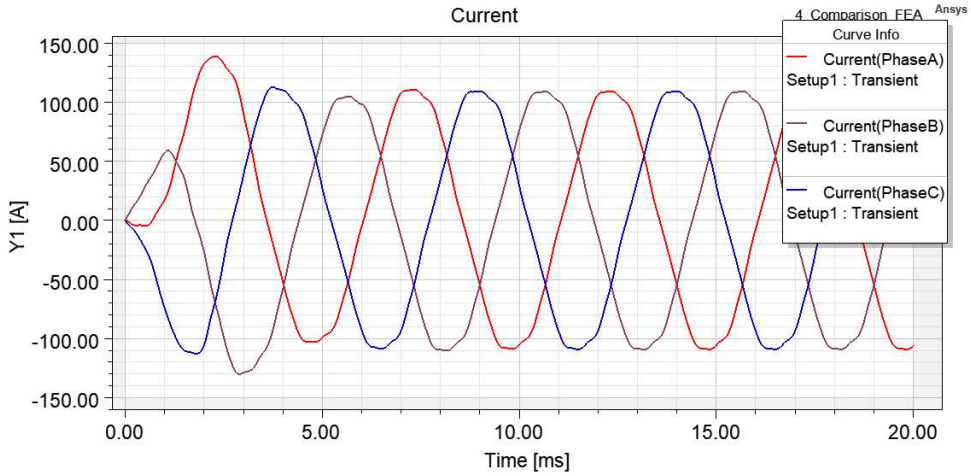


Figura 21. Comparación de las corrientes de la ROM.

3.1 Comparación de resultados

Por último, se hizo una comparación de los resultados obtenidos con el diseño 2D en Maxwell y las generados con la ROM en Twin Builder [11], sobreponiendo las gráficas para una mejor visualización. Como se pudo observar la variación de los resultados obtenidos en una y otra fue muy poca, ya que se puede apreciar que poseen características similares, ya que al igual que los motores convencionales, este pudo replicar el sobre impulso que se genera al momento del arranque, debido a la inercia del rotor y la resistencia inicial a la rotación, así como a su diseño específico para generar un alto torque en el arranque, como se muestra en la Figura 22.

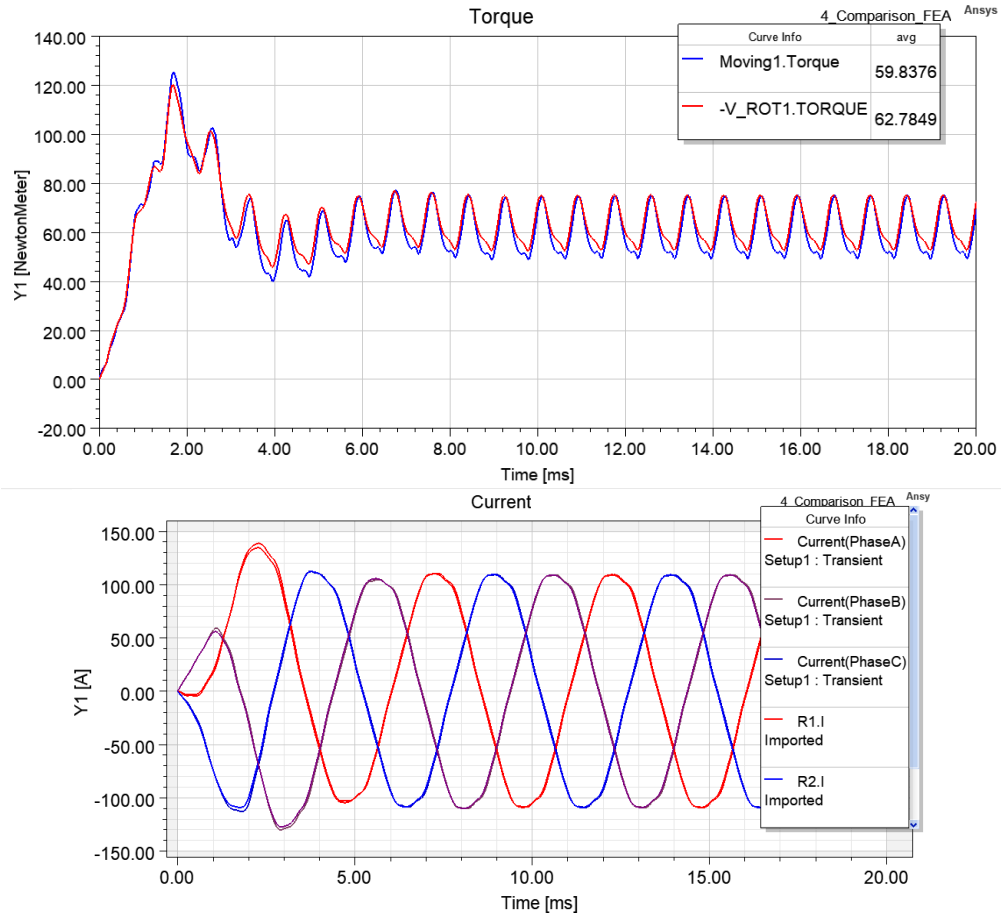


figura 22. Comparación de resultados de Maxwell y la ROM.

4 Conclusiones

Se realizó el diseño de un motor de inducción con la implementación de la tecnología ROM, esto permitió modelar el comportamiento electrónico y mecánico del motor de inducción. Y tras comparar los resultados con los obtenidos del diseño 2D y 3D en Maxwell se obtuvieron resultados bastante precisos y muy similares uno del otro, dando cumplimiento los objetivos del trabajo.

Al usar la ROM obtenemos muchos más beneficios. Ya que el uso de esta tecnología permite disminuir tiempos en la simulación del motor y optimizar el proceso de diseño de estos en comparación con otros métodos usados convencionalmente como el MEF. Resolviendo las problemáticas planteadas al inicio del trabajo.

Una vez teniendo la ROM se puede optimizar el diseño del motor, variando los parámetros de este hasta obtener los adecuados para su óptimo funcionamiento. De esta forma contaremos con un artefacto cercano a la realidad, que nos garantice el correcto y óptimo funcionamiento del motor, previniendo fallas, sin pasar por el tiempo y el recurso destinado a la experimentación física.

Referencias

[1] Colaboradores de Wikipedia. (2022). Moritz von Jacobi. Wikipedia, la enciclopedia libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Moritz_von_Jacobi

[2] WEG. (24 de Noviembre de 2020). AUTO innovaciones. Obtenido de AUTO innovaciones: https://www.auto-innovaciones.com/news/35984-%C2%BFqu%C3%A9-hacambiado-en-el-dise%C3%B1o-de-motores
[3] Mantilla, H. (2018). Diseño y análisis paramétrico de un motor de inducción trifásico de baja tensión con software JMAG. España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación
[4] ANSYS INC. (2022). ANSYS. Obtenido de Welcome to Ansys Electronics Help: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/Electronics/v221/en/home.htm%23Home.htm?TocPath=_____1
[5] ANSYS. (2015). ANSYS Maxwell. ANSYS, INC
[6] Plancad. (2000). Electromagnétismo. Peru: Universidad Peruana Cayetano Heredia.
[7] Córdova, F. (2012). TOROIDE. Perú: CITE energía.
[8] ANSYS. (2021). ANSYS Maxwell Advanced Motor Training. ANSYS INC.
[9] ANSYS. (18 de Octubre de 2019). "¿Qué es un modelo de orden reducido y cuál es su función en el desarrollo de productos?". Obtenido de ANSYS INC.: https://www.ansys.com/blog/what-is-a-reduced-order-model-response-surfacemodel
[10] ANSYS. (2021). Simulation-Based & Hybrid Analytics. ANSYS INC.
[11] ANSYS. (2021). Ansys Twin Builder Product Presentation. ANSYS INC.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 15, pp. 191 – 202
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Diseño de un transformador de potencia por medio de simulación numérica

Ibañez Olvera Mario, Jaramillo Sierra Bethsabet, Balderas Gutiérrez Juan Nabor, Bobadilla López Angel

TecNM – Tecnológico de Estudio Superiores de Tianguistenco
mario_mecatronica@test.edu.mx

Resumen

En el presente trabajo se realizó el diseño de un transformador de potencia por medio de simulación numérica. Como primer paso para el desarrollo del transformador, se obtuvo el diseño asistido por computadora (CAD) del transformador de potencia, que normalmente es el CAD utilizado en la mayoría de las empresas fabricantes de estos dispositivos, este CAD fue diseñado en SOLIDWOKS. El software utilizado para realizar la simulación numérica fue Ansys Electronics, en este software se realizaron una serie de simulaciones previas para entender su funcionamiento, así como también entender la interfaz gráfica de usuario (GUI), y posteriormente elaborar la simulación final del transformador de potencia trifásico; En el software se utilizaron dos módulos Ansys Maxwell y Ansys Icepak. En el módulo de Maxwell se obtuvo la densidad de campo magnético que existen en el transformador de potencia, para ello se requirió hacer una serie de pasos para caracterizar la estructura del transformador y que este tuviera los materiales necesarios para hacer este análisis.
La simulación en el módulo de Ansys Icepak permitió obtener la temperatura en los devanados del transformador de potencia.

Palabras clave: Transformador de potencia, Simulación numérica.

1. Introducción

La simulación numérica es una herramienta que nos permite predecir el comportamiento de ciertos dispositivos, productos o procesos, al saber el comportamiento de estos productos o procesos será posible saber si tendrán alguna falla y de esta manera poder resolverlo ya sea en su diseño o en los materiales utilizados. El método utilizado para realizar la simulación numérica fue por medio de elementos finitos, que es un método numérico para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales, de tal forma que el componente a analizar se divide en un número finito de partes para poder realizar su solución. El software de simulación nos ayuda a predecir el comportamiento de un sistema y se utiliza para evaluar un diseño nuevo, diagnosticar problemas de un diseño existente y probar un sistema en condiciones que son difíciles de reproducir en físico.

Los transformadores de potencia son dispositivos que se encargan de transformar el voltaje de corriente alterna que tiene a la entrada en otro voltaje diferente a la salida, los transformadores tienen ciertas características que hacen que su funcionamiento sea óptimo y depende de ciertas variables como:

- El núcleo está compuesto de un material ferromagnético.
- Las bobinas están compuestas por un cierto número de vueltas(embobinado) y el material es cobre.
- El transformador trifásico está compuesto por 6 embobinados, 3 son embobinados primarios y 3 son devanados secundarios.

- La tensión en la salida puede ser alta o baja dependiendo el número de vueltas en el embobinado secundario.

El principio de funcionamiento de los transformadores es la inducción electromagnética que es el fenómeno que origina la producción de una fuerza electromotriz en un medio o cuerpo expuesto a un campo magnético variable, es por ello por lo que se puede aumentar o disminuir la tensión de acuerdo al número de vueltas del embobinado.

2. Experimental

El desarrollo de la simulación numérica para la validación del transformador de potencia consta del análisis de un transformador trifásico en 3D.

2.1 Análisis de un transformador trifásico en 3D

Para el análisis del transformador, se obtendrá el núcleo el cual se configurará el material para poder visualizarlo como se muestra en la figura 1.

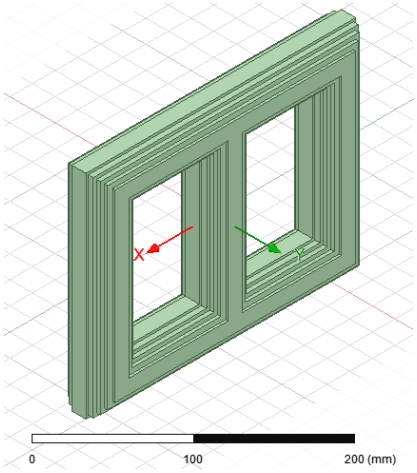


Figura 1. Construcción del núcleo en 3D.

Posteriormente se realizan las bobinas con los datos de la tabla 1.

Tabla 1. Configuración de datos para las bobinas.

Name	Value	Unidades	
DistLeg	100	mm	100mm
ColiType	2	mm	2mm
WidthIn	42	mm	42mm
DethIn	42	mm	42mm
RadiusIn	21	mm	21mm
ThickCoil	10	mm	10mm
HighCoil	96	mm	96mm
Layers	1	mm	1mm
GapLayer	4	mm	4mm
IrfoCore	0	mm	0

Contando con las 3 bobinas realizadas, para trabajar de maneras más eficiente se le ombrara distinto a cada una de ellas y se trabajará en la parte secundaria para obtener las bobinas como se muestra en la figura 2.

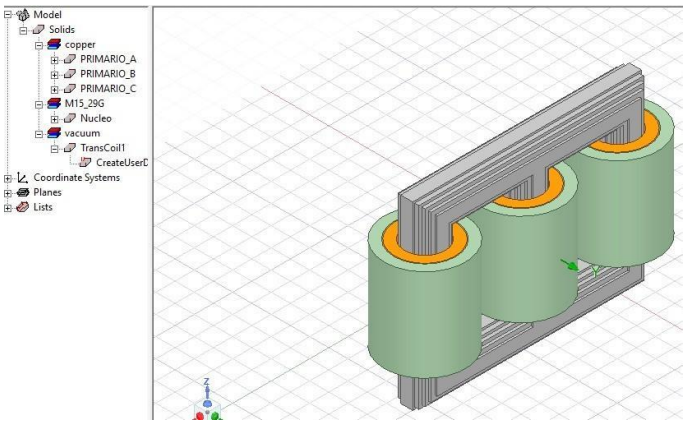


Figura 2. Representación de embobinados secundarios A, B, C.

De igual manera se trabajará de manera individual y se les asignará un nombre distinto a las bobinas secundarias como se muestra en la figura 3.

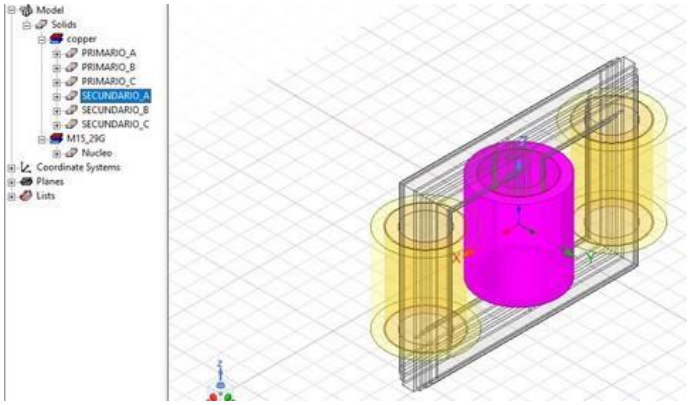


Figura 3. Separación de secciones con función booleana.

En el cual se creará la superficie donde se generará una corriente en las tres bobinas, una vez separando cada una se les asignará una excitación a los primarios como se visualiza en la figura 4. Así mismo se agregará excitaciones a las bobinas secundarias como se muestra en la figura 5.

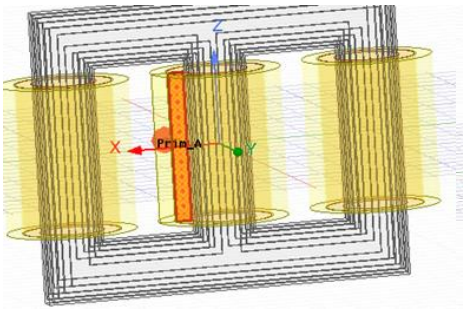


Figura 4. Excitaciones primarias.

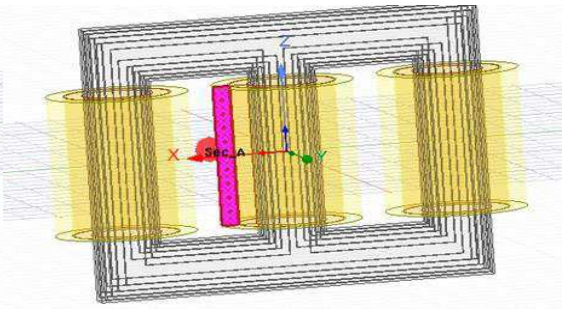


Figura 5. Excitaciones secundarias.

Los datos proporcionados al software para la configuración de la excitación son los mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Datos para las excitaciones de bobinas primarias y secundarias.

Descripción	Valor
Resistencia del Primario A, B, C	2ohm
Resistencia del Secundario A, B, C	4ohm
Voltaje	120*sin(2*pi*60*time)

El voltaje de entrada está definido por la siguiente ecuación:

$$V_{in} = 120 * sin(2 * pi * 60 * t) \quad (1)$$

Donde:

120 es la amplitud de la señal. El argumento de la función del seno está compuesto por *t* (time) que es el tiempo de aplicación, *pi* son los grados de la onda, *60* es la frecuencia de la señal, y por último el *2* representa la multiplicación por pi para generar los *360* grados de la senoide.

Posteriormente las terminales se colocan en las respectivas bobinas para poder seleccionar la región y poder configurar el análisis y la validación como se visualiza en la figura 6.

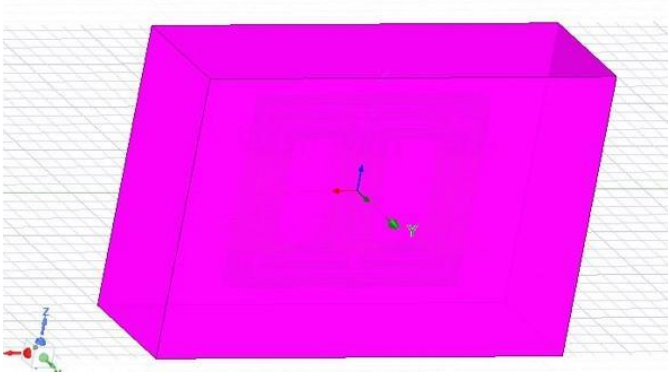


Figura 6. Representación de la región.

Para comenzar con el análisis del transformador de potencia lo primero que se necesito fue el diseño en CAD, el CAD utilizado está diseñado a partir de un transformador de potencia estándar que fue modelado con el Software de SolidWorks y exportado a ANSYS Electronics para posteriormente agregar las configuraciones del material, el número de conductores, el voltaje que se utilizara para realizar la simulación, la resistencia y así tener un análisis preciso del comportamiento del transformador, como se muestran en la figura 7 y 8.

La configurar el tipo de solución que utilizaremos para realizar este desarrollo, en este caso utilizaremos una solución *Transient* (Transitoria), la solución transitoria nos permite modificar los valores del tiempo en el que se va a trabajar para tener un resultado de acuerdo con lo que deseemos, En este caso para el núcleo del transformador se le asignó en Material: M15_29G el cual es un material Ferromagnético y se reconoce con el color Gris.

Por otra parte, las bobinas, dividiremos sus bobinas en Primarias y Secundarias seleccionandolas como A, B y C, asignándolas con el material de Cobre. Reconociéndolas en el CAD con el color verde.

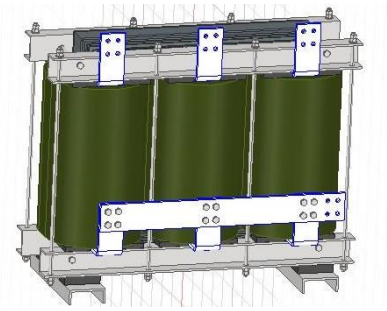


Figura 7. Diseño en SOLIDWORKS del transformador de potencia que se utilizara en la simulación.

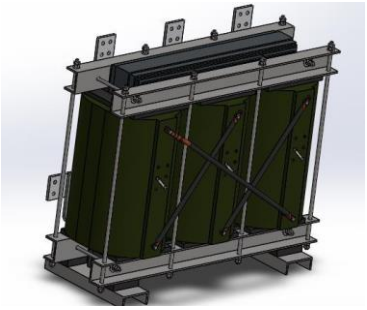


Figura 8. Diseño en CAD del transformador exportado desde Ansys.

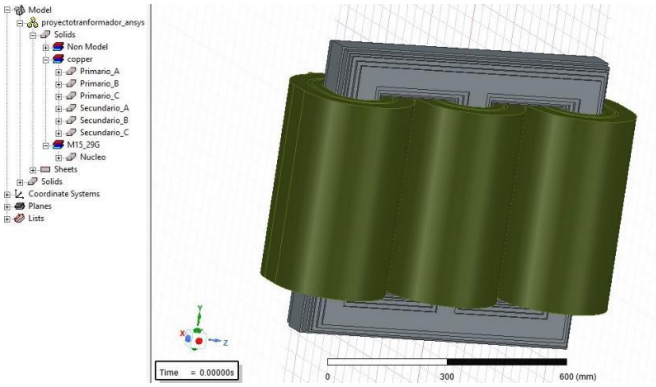


Figura 9. Sección de las bobinas (secundario, primario) y núcleo ya configuradas.

Al término de las configuraciones del material y del nombre se hizo la creación de las superficies donde se generarán las corrientes, para ello seleccionaremos las bobinas de la sección *primaria* y *secundaria* de todas las bobinas, Figura 10.

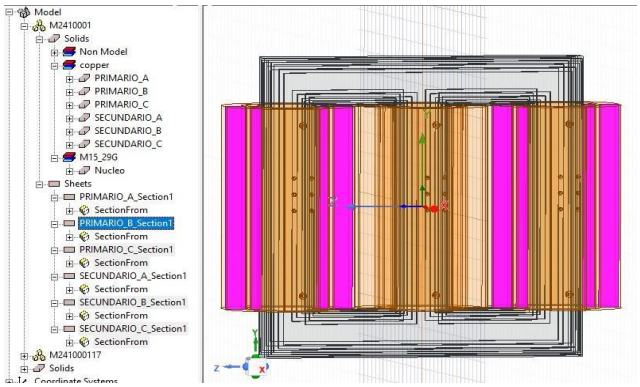


Figura 10. Excitaciones agregadas en las bobinas de los sectores faltantes en el plano YZ.

El número de vueltas que tendrá el embobinado principal de cada una para el análisis de este diseño es de 100 vueltas y para el embobinado secundario, como el transformador que estamos analizando es de subida, el número de vueltas en el embobinado secundario será el doble, en este caso como en la parte primaria le dimos un embobinado de 100 vueltas, para el embobinado del secundario el número de vueltas que configuraremos será de 200 vueltas.

Se excita cada bobina primaria mediante sus devanados, el voltaje que entra se calcula mediante la ecuación (1), teniendo una desfase en cada una de "*+ 120deg*". La resistencia, al ser todas las bobinas iguales cuentan con un valor de *100 ohm*.

Tabla 3. Excitaciones de Bobinas primarias A, B y C.

Primario_A	Primario_B	Primario_C
Resistencia:		
100 ohm	*100 ohm*	*100 ohm*
Voltaje:		
*120*sin(2*pi*60*time)*	*120*sin(2*pi*60*time+120deg)*	*120*sin(2*pi*60*time+240deg)*

Para las bobinas secundarias, estas son inducidas por las primarias, por el principio de inducción electromagnética por lo que su voltaje será calculado por el software. En la resistencia se escribe el doble ya que es un transformador de subida, esto se realiza de acuerdo con la fórmula para calcular el número de vueltas del transformador.

El apartado de *Icepak* que es una herramienta que nos ayudará a simular la temperatura con la que cuenta el transformador.

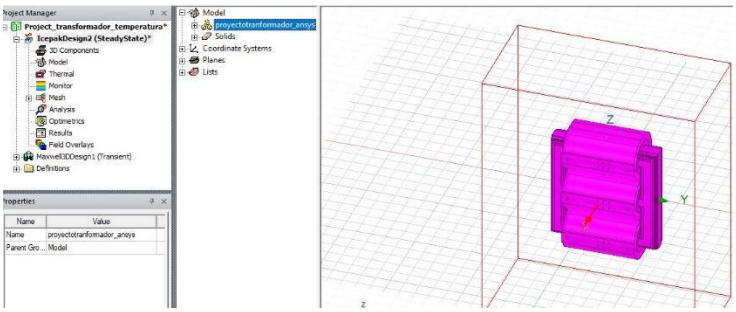


Figura 11. Modelo del transformador en la sección de *Icepak*.

Se agregó los flujos de corriente de viento que circularán por el transformador, en este caso serán dos, el flujo de entrada y el flujo de salida entre las 3 bobinas del sector primario y tres bobinas del sector secundario.

3. Resultados

Para realizar nuestros análisis determinamos la región, dependiendo del tamaño del diseño y de lo que se requiera obtener, para este estudio será una región del *25%* con las características de la tabla 4.

Tabla 4. Configuración de la solución con el tiempo.

General	Save fields
Stop time: 40ms	Star: 20ms
Time step: 1ms	Stop: 24ms
	Step size: 1ms
Solver:	
Nonlinear residual: 1e^-4	

3.1 Resultados del análisis de una bobina por medio de simulación numérica.

En la bobina se aprecia que hay un ligero campo magnético, el mayor campo magnético ocurrido en la bobina es de *0.000069 teslas* y posteriormente se realizó el análisis de los campos vectoriales.

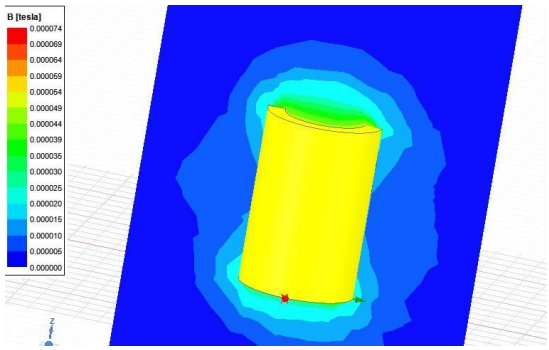


Figura 12. Representación del campo magnético en la bobina.

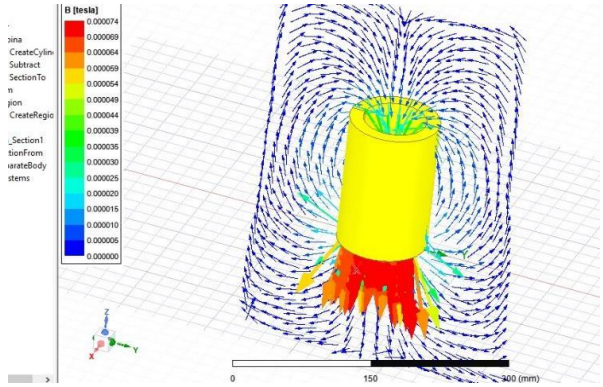


Figura 13. Representación en la bobina de los campos vectoriales.

3.2 Resultados del análisis de un transformador trifásico en 2D.

Es la creación del campo magnético que transmite el núcleo de nuestro transformador para el mallado.

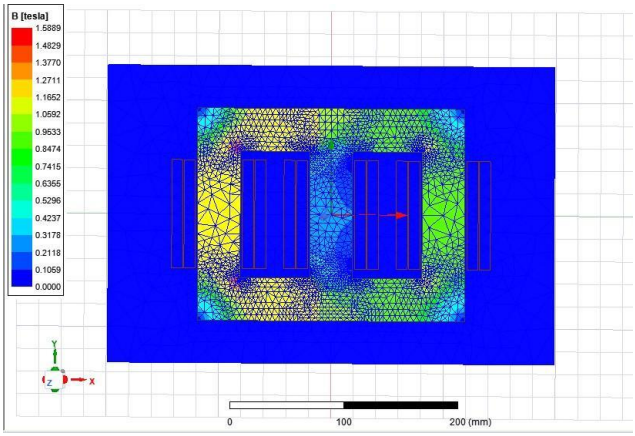


Figura 14. Mallado del transformador en 2D.

3.3 Resultado del análisis de un transformador trifásico en 3D.

Se obtuvo la gráfica que representa el comportamiento de los voltajes inducidos en los embobinados A, B, C.

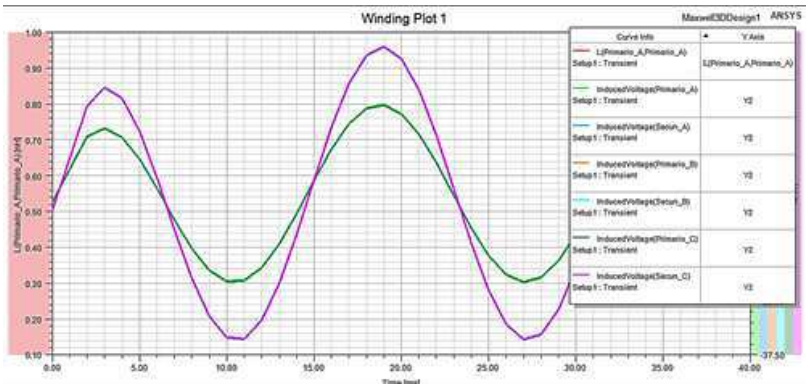


Figura 15. Gráfica del voltaje inducido.

Por otro lado, se obtuvo la presentación de la densidad de los campos magnéticos en el transformador.

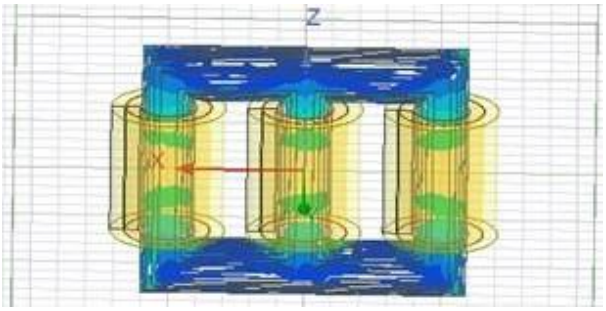


Figura 16. Densidad de los campos magnéticos.

3.4 Resultados del desarrollo final del transformador de potencia trifásico.

Por último, se muestran los resultados del comportamiento del voltaje de entrada tanto como de los voltajes inducidos. En la siguiente Figura 17 se aprecia el comportamiento del voltaje inducido, debido a que es un transformador de potencia trifásico están desfasadas cada 120 grados.

Figura 17. Gráfica de voltaje inducido por las bobinas secundarias.

En la figura 17 se muestra la comparación del voltaje inducido del sector primario A y el sector secundario A, en este caso el voltaje inducido primario A tiene una menor amplitud y la parte secundaria tiene una mayor amplitud ya que de acuerdo con nuestras configuraciones desarrollamos el transformador elevador y en el secundario debemos tener una amplitud doble a la parte primaria.

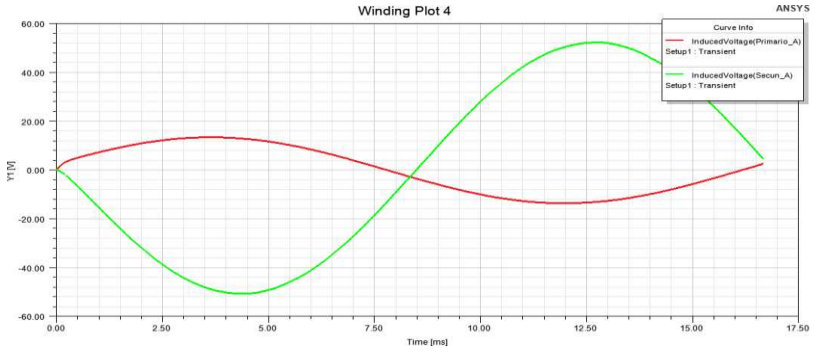


Figura 18. Comportamiento voltaje inducido Primario y Secundario de embobinado A.

Segundo caso de voltaje inducido comparada en el sector primario y secundario B, en este caso obtendremos los mismos resultados, la parte secundaria tendrá una mayor amplitud a la parte primaria B.

Figura 19. Comportamiento voltaje inducido Primario y Secundario de embobinado B.

Posteriormente se realizará el análisis del flujo magnético del núcleo y de la densidad del campo magnético de las bobinas. En este caso es muy poco ya que tenemos un núcleo con material ferromagnético y hace que la densidad de campos circule por él y debido a esto es muy poca densidad en las bobinas.

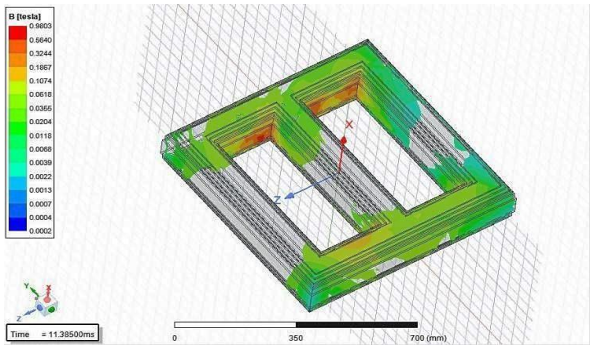


Figura 20. Representación del flujo magnético en el núcleo.

Posteriormente se hizo el análisis de la densidad de campo magnético en las bobinas, en este caso es muy poco ya que tenemos un núcleo con material ferromagnético y hace que la densidad de campos circule por él y debido a esto es muy poca densidad en las bobinas.

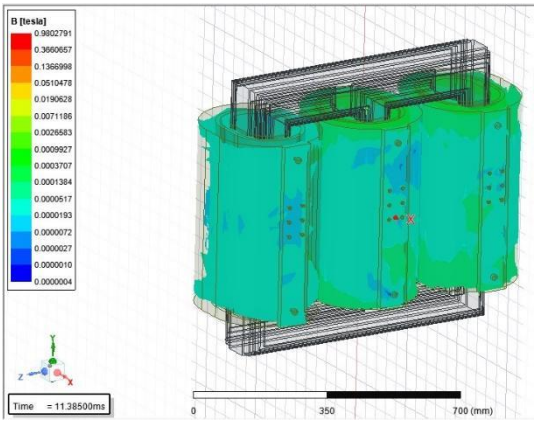


Figura 21. Representación de campos magnéticos en las bobinas.

Dándonos cuenta de que la densidad de campo magnético es mayormente atraída por el núcleo.

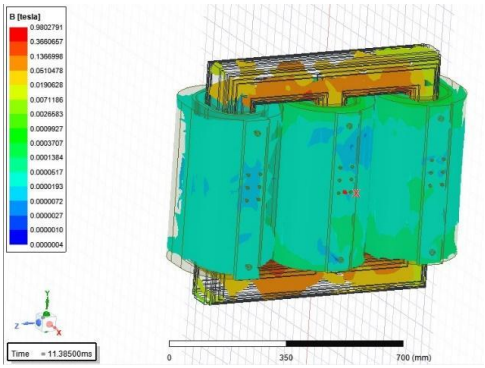


Figura 22. Representación de campos magnéticos en las bobinas y el núcleo.

En la figura 23 se aprecia la gráfica de los voltajes inducidos en primario y secundario A, esto demuestra que el transformador de potencia está desarrollando su función como elevador ya que el voltaje secundario es mayor al voltaje primario.

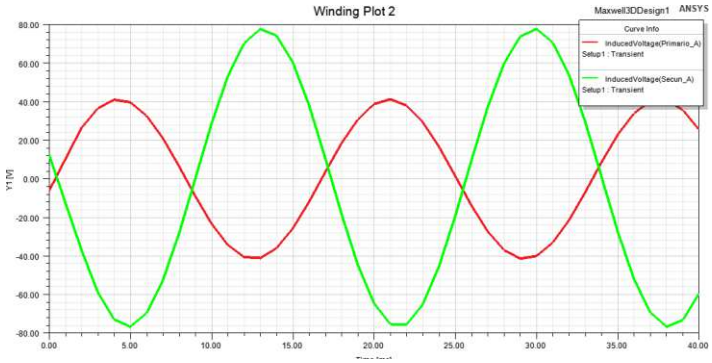


Figura 23. Voltaje inducido Primario y Secundario.

3.4 Resultados del Análisis de temperatura final del transformador.

En la siguiente Figura se muestra en grados centígrados en qué lugar hay una mayor temperatura, en este caso es en donde se ubican las entradas de las excitaciones que son los sectores primario A, B y C, la temperatura más alta es de 20.0016° centígrados.

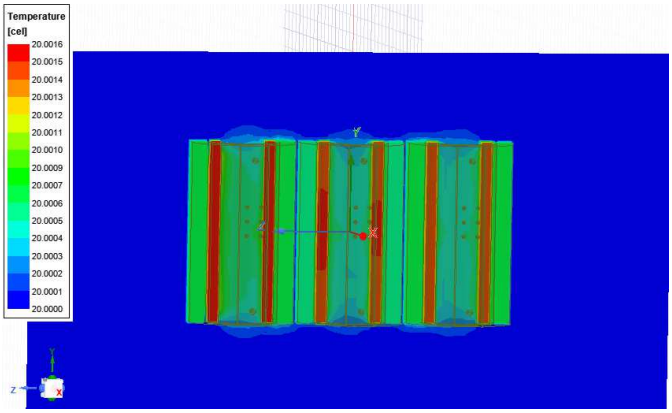


Figura 24. Representación de los comportamientos de la temperatura en el transformador.

4. Conclusiones

A partir de la simulación numérica en el transformador se logró un aumento considerable de la eficiencia de este, con lo cual se logró disminuir los costos del diseño y mejorar la vida útil del transformador.

De acuerdo con los materiales utilizados y las configuraciones realizadas en Maxwell se llegó a un resultado esperado ya que la densidad de campo que se obtienen circula mayormente por el núcleo esto permite saber que el modelo de transformador utilizado está diseñado correctamente.

Con las configuraciones realizadas, así como los resultados obtenidos en los módulos de Maxwell y *Icepak* podemos deducir que el transformador de potencia diseñado tendrá una vida útil amplia debido a que uno de los factores que más afecta a los transformadores y que deduce la vida útil de estos es el aumento excesivo de la temperatura, en nuestro modelo analizado el transformador tuvo una temperatura que se considera baja.

El flujo de trabajo desarrollado es el adecuado para la generación de transformadores por medio virtual, debido a que se desarrollaron los pasos necesarios para llegar a la solución deseada, considerando todas las variables se deduce que es óptimo debido principalmente al tiempo y la reducción de costos, así como también el aprendizaje paso a paso para lograr una correcta simulación con los valores y características requeridas de un transformador de potencia.

Referencias

[1] Dianelis Abreu Alemida. (2010). Simulación Dinámica de Transformadores. Facultad de Ing. Eléctrica. UCLV.
[2] Giuseppe Mirlisenna. (22 de enero de 2016). MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS: ¿QUÉ ES? de ESSS Sitio web: https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos- finitos-que-es/
[3] Severino Argüelles García. TRANSFORMADORES. de SEMINARIO DE TECNOLOGÍA Sitio web:http://www.ingenieros.es/files/Proyectos_1/ELECTROTECNIA_TRANSFORMADORES.pdf

[4] khanacademy. (1017). ¿Qué es la ley de Faraday?, de ¿Qué es la ley de Faraday? Sitio web: https://es.khanacademy.org/science/physics/magnetic-forces-and-magnetic- fields/magnetic-flux-faradays-law/a/what-is-faradays-law
[5] R. E. Alvarez, M. del pozo. (24 mayo 2007). Mantenimiento de transformadores de potencia. de cigre Sitio web: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/36793/Documento-%20completo.04_Alvarez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
[6] Ana Maria de la cruz. (mayo 30, 2019). Tipos De Transformadores De Potencia, Que Son Y Cómo Funcionan. de Unisalia Sitio web: https://unisalia.com/tipos-de-transformadores- de-potencia/
[7] Héctor Daniel Villanueva Hernández. (2007). Obtención de parámetros en transformadores mediante elementos finitos usando ANSYS. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
[8] Christian Bermúdez, Darwin Alcocer. (mayo 2019). Co-simulación magnética y circuital de un modelo de transformador de potencia en software Ansys Maxwell. Bogotá Colombia.
[9] Jeimy Daihana Patiño Hernández, Juan Pablo Ramírez Ramírez. (febrero 2016). Simulación de la prueba de cortocircuito para transformadores utilizando un sistema F.E.A. Universidad Tecnológica de Pereira.
[10] Sebastián Reyes Sáenz, Juan Felipe Medina Reina. (septiembre 2017). Estudio comparativo entre mallados volumétrico y superficial para el cálculo de pérdidas por corrientes inducidas en partes estructurales de transformadores. Universidad de la Salle.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 16, pp. 203 – 213
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Construcción e instrumentación de un robot cartesiano mediante una interfaz entre Matlab y FPGA

Gonzalez Villagomez Esau, Gonzalez Villagomez Jacob, Rodriguez Donate Carlos, Calderon Uribe Uriel

Departamento de Estudios Multidisciplinarios, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.

Resumen

La construcción de robots de manera didáctica tiene una gran relevancia en estos últimos años debido a que fomentan la investigación y la educación en muchas áreas de la ciencia, por lo cual los investigadores han tratado de desarrollar robots que puedan manipularse mediante una interfaz que facilite la interacción humano-robot. En este artículo se propone la construcción e instrumentación de un robot cartesiano, el cual es de gran utilidad en el área industrial e investigación y puede manipularse mediante una interfaz gráfica. Entre las principales aportaciones a destacar es la codificación que se utiliza para mantener una comunicación bilateral entre el robot y la interfaz gráfica mediante tramas de datos codificados enviados por el protocolo RS-232. El rendimiento del sistema en el FPGA es eficiente debido a que solo consume menos del 9% de las unidades lógicas y su frecuencia de operación es de 198 MHz.

Palabras clave: Robot Cartesiano, FPGA, Interfaz gráfica, Instrumentación.

1. Introducción

Hasta hace 20 años los procesos en la industria eran hechos por trabajadores, aunque la calidad de los productos era buena, en algunos casos estos procesos eran nocivos para la salud o muy repetitivos provocando el desinterés del trabajador y por consecuencia la mala elaboración de los productos. Por lo cual, el hombre comenzó a industrializar estos procesos mediante la fabricación de robots o manipuladores que hicieran este trabajo [2-4]. Existen ciertas dificultades a la hora de establecer una definición formal de lo que es un robot industrial. La primera de ellas surge de la diferencia conceptual entre el mercado japonés y el euro-americano de lo que es un robot y lo que es un manipulador. Así, mientras que para los japoneses un robot industrial es cualquier dispositivo mecánico dotado de articulaciones móviles destinado a la manipulación, el mercado occidental es más restrictivo, exigiendo una mayor complejidad, sobre todo en lo relativo al control [5]. Además, la evolución de la robótica ha ido obligando a diferentes actualizaciones de su definición. La definición más común es la de la Asociación de Industrias de Robótica (RIA, Robotic Industry Association), según la cual:

"Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas [5]".

En la literatura, se han presentado varios trabajos relacionados con el mejoramiento, diseño o implementación de robots cartesianos. Por ejemplo, en el trabajo desarrollado en [7] se ha propuesto la construcción de un robot cartesiano con actuadores lineales y motores a pasos, en este trabajo se utilizó la tarjeta comercial LinMot E400 de cuatro ejes, donde se implementó un controlador Proporcional-Integra-Diferencial (PID), en base a los resultados reportados, se pudo observar que este sistema de control tiene errores muy pequeños con respecto a la trayectoria a seguir. Por otro lado, en la tesis propuesta en [8], se diseñó y modeló un robot para el posicionamiento de piezas en el módulo

de almacenamiento de un laboratorio de automatización y robótica, este robot consta de tres grados de libertad, donde el último eslabón tiene una pinza para sujetar las piezas a almacenar; en cuanto a control y dispositivos electrónicos usados, se implementaron motores a pasos para mover el robot y se diseñó un circuito para poder manipularlos mediante un PLC. En el trabajo reportado en [9], se realizó un estudio para la construcción de un robot cartesiano, aunque no se hizo ningún prototipo si se presenta un análisis sobre los costos de diferentes actuadores, sensores, sistemas de control, entre otros. A diferencia de los robots cartesianos convencionales que solo siguen líneas rectas, en la tesis propuesta en [10], se ha presentado el diseño mecánico y manufactura de cada uno de los eslabones de un robot cartesiano, con el objetivo de reproducir trayectorias mediante una interfaz creada en Visual; este proyecto está orientado para la construcción de PCB con un robot cartesiano obteniendo muy buenos resultados. También se pueden encontrar muchos trabajos sobre el mejoramiento e implementación en diversas áreas como en [11], donde se propuso mejorar la velocidad y la precisión de un robot cartesiano para capturar objetos, el cual es controlado por un sistema de visión que le indica al robot los movimientos que debe de hacer. En el trabajo [12] los autores han propuesto el uso de un robot cartesiano para aplicaciones dentales, donde se modeló y diseñó un robot para mejorar la precisión de dichas aplicaciones, ya que se analizaron los problemas de los métodos comunes y se observó que el proceso era muy largo por diversas etapas en las que el profesional tenía que estar ajustando la dentadura para un buen trabajo y se requería un mejor proceso y más rápido, sin embargo, el trabajo se limita a la simulación. En [13] fueron evaluados dos robots manipuladores con diferentes sistemas de control y diseño, uno servo visual y el otro con plataforma electroneumática obteniendo muy buenos resultados según los esperados por ellos. En el trabajo realizado en [14], se propuso un robot manipulador cartesiano el cual conlleva un sistema de control que no requiere de la medición de la velocidad y la cinemática inversa para el posicionamiento del mismo, sino que el diseño está basado en los observadores proporcionales integrales generalizados. Parte fundamental de los trabajos descritos anteriormente es la manipulación de los robots mediante una interfaz gráfica, ya que esta es la única forma en la que el robot y el usuario pueden interactuar, como es el caso de los trabajos presentados en [15-16], donde se ha propuesto la manipulación de los robots mediante un teléfono inteligente.

Se puede determinar a través de la literatura que los sistemas robóticos son de suma importancia en el sector industrial, pero tienen un elevado costo y su arquitectura es totalmente cerrada. Por estas razones, la propuesta de este trabajo es construir e instrumentar un robot cartesiano con arquitectura abierta, al realizar el sistema robótico con arquitectura abierta permitirá que los alumnos o profesores puedan explorar diferentes líneas de investigación como control digital, instrumentación, diseño de trayectorias, entre otras. Además, la propuesta de la comunicación entre el robot y la interfaz gráfica del usuario mediante tramas de datos codificados simplifica y automatiza la parametrización del controlador y la interacción entre el usuario y el robot.

2. Metodología

El desarrollo de este trabajo se realiza en cuatro etapas como se muestra en la figura 1: diseño mecánico, instrumentación, diseño del sistema de monitoreo e interfaz de usuario.

A continuación, se dará una breve descripción de cada una de las etapas que se desarrollarán:

- Construcción. En esta etapa se realizará el diseño del robot cartesiana, de 1.5 X 1.5 x 0.5 metros (largo, alto y ancho), el material a utilizar será de perfiles Bosch, también se integrarán los servomotores, servoamplificadores, para cada eslabón.
- Instrumentación. En esta etapa se realizarán las conexiones requeridas para la etapa de instrumentación, sistema de control y sistema de monitoreo. Por otro lado, se integrará un FPGA como elemento central de control, donde se desarrollarán los controladores para los sensores de límite y encoder.
- Monitoreo. La etapa de monitoreo consistirá en adquirir las señales de la etapa de control, las cuales serán la señal de referencia, señal de control, señal de retroalimentación, además de adquirir las señales de los sensores de límite. Este sistema se basa en un FPGA, donde se integrarán los controladores para adquirir las diferentes señales.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 16, pp. 203 – 213
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

- Interfaz Gráfica. La finalidad de esta etapa es facilitar la interacción entre el usuario, el sistema de monitoreo y el sistema de control del robot. El diseño de la interfaz se realizó con el software utilizado fue Matlab.

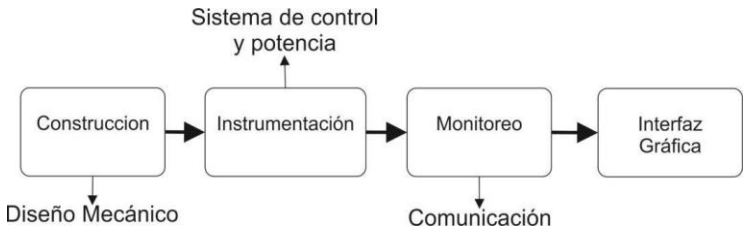


Figura 1. Diagrama a bloques de la Metodología.

2.1 Diseño e instrumentación

El diseño del robot cartesiano se basó en el robot ASRS (Automatic Storage & Retrieval System) [17]. En la figura 2, se muestra el diseño del robot desde diferentes perspectivas.

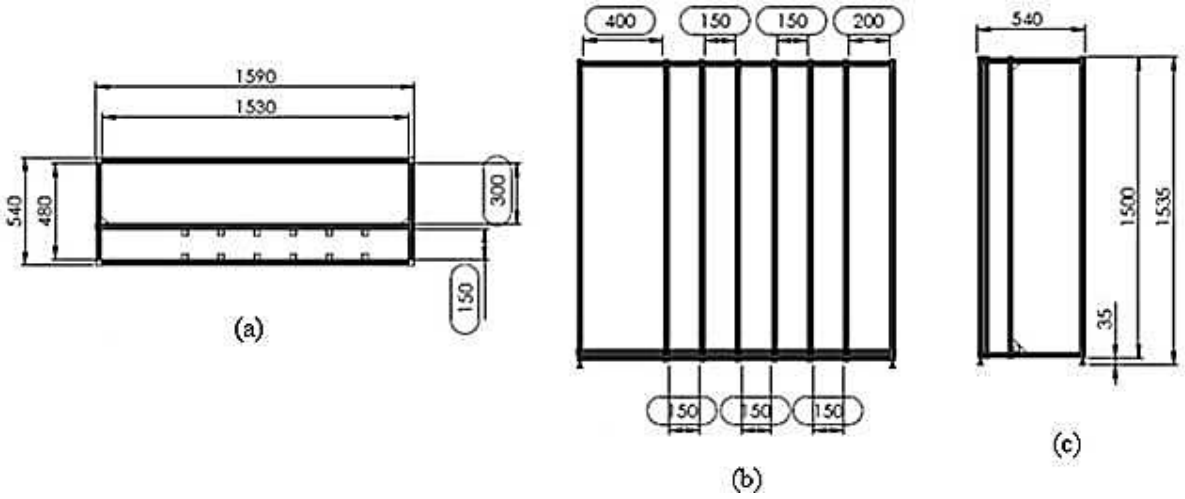


Figura 2. Diseño de la estructura del robot, (a) vista superior, (b) vista frontal, (c) vista lateral.

En el espacio de trabajo del robot cartesiano, se ubican los dos eslabones, uno para el eje Y (vertical) y otro para el eje X (horizontal). El desplazamiento de cada eslabón se realiza con el servomotor DCM50202 [18] acoplado a una barra con cuerda sin fin.

La etapa de instrumentación de la estructura robótica se realizó con sensores de límite E18-D80NK-N [19], para determinar el espacio de trabajo de los eslabones y los encoder para definir la posición del eslabón (figura 2). Para los sensores de límite se utilizaron sensores de límite infrarrojos y para la posición se utilizó el encoder que se encuentra unido al servomotor mencionado (DCM50202).

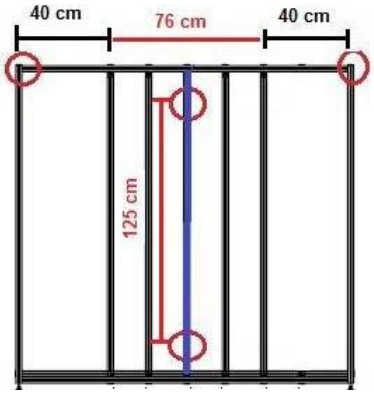


Figura 3. Posición de los cuatro sensores de límite infrarrojos y área de trabajo del robot.

La etapa de calibración se realizó mediante el ajuste del potenciómetro de precisión. Para el eslabón X se dejó una distancia de 40 cm para ambos lados del eslabón, por lo cual queda una distancia de 76 cm para que el eslabón se desplace. En el eje Y, los sensores solo detectan cuando el panel cruza por los sensores, para este caso la distancia de operación del eslabón quedo de 125 cm (figura 3).

El servomotor utilizado cuenta con un encoder de 1000 pulsos por revolución acoplado a su eje. Tomado como referencia la vista frontal de la estructura, el encoder del eslabón X se encuentra ubicado en la parte superior derecha, mientras que el encoder del eslabón Y se encuentra en la parte superior del robot; esto se muestra en la figura 4.

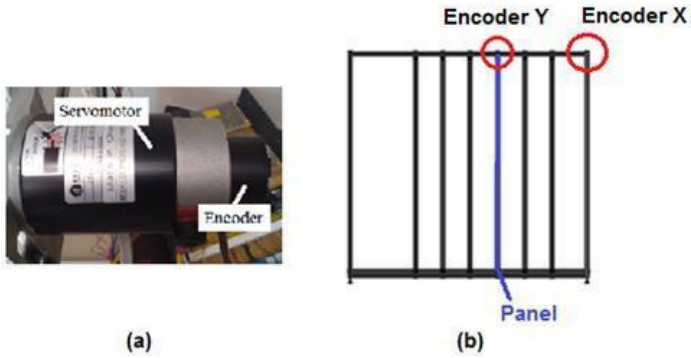


Figura 4. Ubicación de encoder en la estructura y el servomotor, (a) encoder en el servomotor, (b) encoder en la estructura.

La forma de operación del encoder que se utilizó fue la de cuadratura, ya que con esta configuración se puede medir la posición y sentido de giro del servomotor.

2.2 Sistema de Control y Potencia

En esta sección se describen cada una de las etapas del panel de control del robot, entre los cuales se encuentra las fuentes de alimentación, servocontroladores, borneras de conexiones y el FPGA donde se implementaron los diseños realizados y el controlador. El panel cuenta con dos fuentes de voltajes RPS2410, la cual se alimenta directamente a la línea alterna y entrega 24 V de salida. Como se muestra en la figura 5 (a), esta fuente cuenta con tres salidas de 24 V y un regulador de voltaje para calibrar o regular la salida en ± 10%. Estas fuentes alimentan al servocontrolador DCS30, que alimentan al servomotor del eslabón. En la figura 5 (b) se puede observar el servo amplificador, este dispositivo de DC, está desarrollado con un DSP (Digital signal processor) y tecnología MOSFET (Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor); cabe destacar que este tipo de servocontrolador presenta un mejor desempeño en velocidad, precisión y estabilidad, que los servocontroladores de AC. La bornera de conexiones se muestra en la figura 5 (c), a estas terminales llegan todas las señales de alimentación,

de control o monitoreo. Las conexiones de la parte inferior fueron utilizadas para conectar directamente los dispositivos y las conexiones de la parte superior se utilizaron para conectar el dispositivo de control (FPGA).

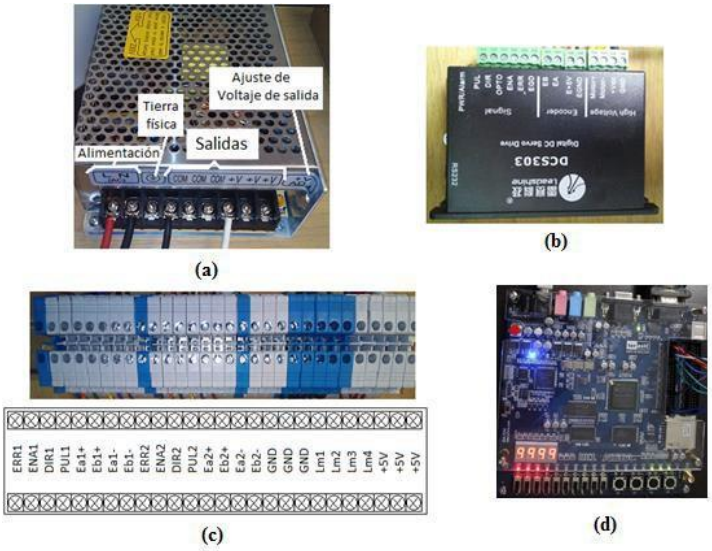


Figura 5. Etapa de potencia y control (a) Fuente de voltaje RPS2410, (b) Servocontrolador DCS30, (c) bornera de conexiones, (d) FPGA.

Finalmente, la tarjeta donde se encuentra embebida la ley de control es el kit de desarrollo DE1 de Altera que cuenta con el FPGA Cyclone II EP2C20F484 (figura 5 (d)), de esta tarjeta se utilizó el conector RS-232, el oscilador interno de 50 MHz y uno de los puertos de expansión de pines de la tarjeta.

2.3 Comunicación e Interfaz gráfica

La interfaz gráfica de usuario se realizó con el software Matlab, y tiene la finalidad de facilitar la reconfiguración de la ecuación en diferencias de la ley de control que rige el movimiento de los eslabones y para monitorear los sensores de límite, señales de encoder y señales de error del controlador. En la figura 6 se muestran los cuatro paneles de la interfaz gráfica; el panel uno permite reconfigurar la ley de control que rige el movimiento de los eslabones, el panel dos se utiliza para enviar la referencia hacia el controlador y para iniciar o detener el movimiento de los dos eslabones. El panel tres solo es para monitorear los sensores de límite, finalmente el panel cuatro muestra la gráfica de las señales de encoder (posición del eslabón) y la señal de error, para ambos eslabones.

Parte fundamental de la interfaz gráfica de usuario, es la comunicación con el sistema de control, esta interacción se realiza mediante el protocolo de comunicación RS-232, que fue configurado para trabajar a una velocidad de 9600 baudios. La información enviada son A0, A1, A2 y B1, que corresponden de la ecuación en diferencias del controlador, el periodo de muestreo Ts y las señales de referencia para cada eslabón Dx y Dy. Debido a que el protocolo RS-232 es para transferencias de 8 bits, se propuso enviar 7 tramas por cada parámetro. De las cuales, la primera y la última indicarán el código de identificación del parámetro y las cinco tramas restantes serán el dato del parámetro a reconfigurar (figura 7).

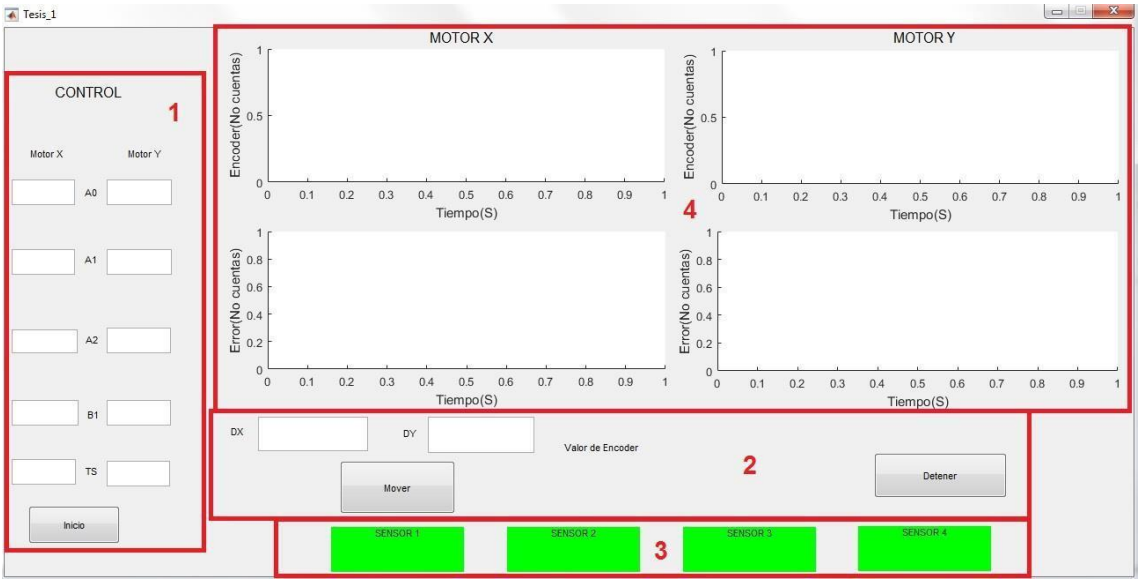


Figura 6. Interfaz gráfica de usuario para manipular los parámetros del controlador y monitorear las señales de los sensores del robot.

Figura 7. Acondicionamiento de un dato para enviarlo vía Rs232.

El proceso de recepción de la interfaz se utiliza para estar monitoreando la posición del eslabón (señales de encoder), la señal de error del controlador y las señales de los sensores de límite (figura 8).

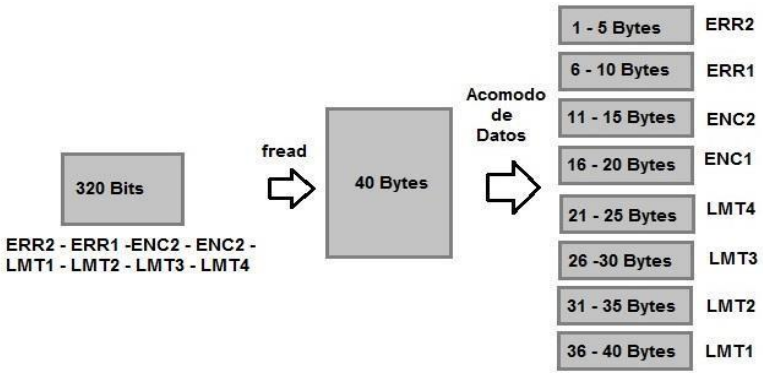


Figura 8. Proceso de asignación de datos recibidos del FPGA.

Finalmente, la etapa de monitoreo de la interfaz gráfica se realiza mediante las gráficas del panel 4 y los indicadores del panel 3. Referente a las gráficas, se estarán mostrando la posición del eslabón y la señal de error del controlador, para ambos eslabones. Este proceso se estará realizando entiempo real; además, se estará almacenando la información en un archivo que contendrá la información de estas señales. Por otro lado, los indicadores del panel 3 indicarán en color verde si el eslabón se encuentra en su espacio de trabajo, de lo contrario se pondrán en color rojo lo que indica que se encuentra fuera del espacio de trabajo y podría causar una colisión con la estructura del robot.

2.4 Diseño de Arquitecturas en FPGA

Todas las arquitecturas diseñadas se realizaron mediante lenguaje de descripción de hardware

(VHDL) y fueron integradas al sistema embebido que se encuentra en el FPGA. A continuación, se describirán cada una de las arquitecturas diseñadas, fundamentalmente consiste en el controlador para el protocolo RS-232, módulo de reconfiguración y módulo de monitoreo.

2.4.1 Módulo de transmisión y recepción de datos

El módulo de recepción del protocolo se muestra en el diagrama de la figura 9. Para comenzar el proceso de recepción, en la señal Rx debe de estar el bit de inicio, si este bit ha llegado, el temporizador generará el tiempo requerido para asegurar que se ha recibido el primer bit, cuando el temporizador indica un alto en la señal Z1, el temporizador comenzará a contar los bits recibidos hasta que se hayan capturado los 11 bits de la trama, lo cual se indicará con la señal Z2 en alto. Finalmente, el dato recibido se carga en el registro (DRx) y la señal RDyRx se pone en alto para indicar que se ha recibido una trama completa de 11 bits. La sincronía entre el temporizador, contador, registro y registro de desplazamiento se realiza mediante la máquina de estados finitos (FSM).

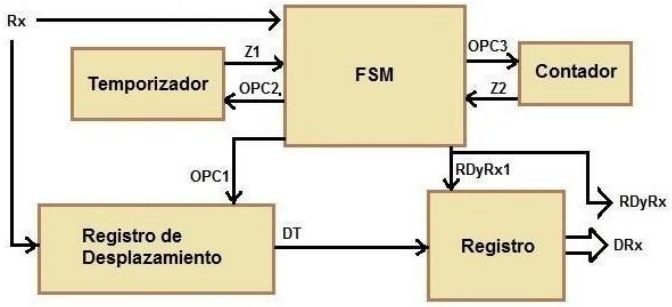


Figura 9. Diagrama a bloques del proceso de recepción de datos.

Por otro lado, el diseño del módulo de transmisión de datos mediante el protocolo RS-232 se muestra en la figura 10. Esta unidad comenzará a transmitir la información con una señal de inicio, esto provocará que la FSM active el temporizador, al contador y al registro de desplazamiento.

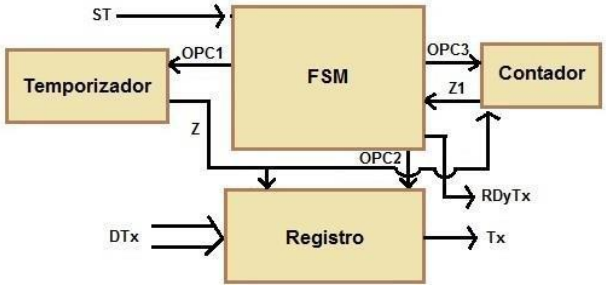


Figura 10. Diagrama a bloques del módulo de transmisión.

2.4.2 Reconfiguración del sistema de control

Este módulo se diseñó para poder interactuar entre el sistema embebido en el FPGA y el usuario, utilizado la interfaz gráfica que se diseñó, los parámetros que se pueden modificar son los coeficientes del PID y la señal de referencia de cada eslabón. La función de esta arquitectura consiste en lo siguiente:

1. Cuando el módulo RS232 recibe un dato, la señal RDyRx se pone en alto, lo que indica que esta arquitectura debe de tomar el dato y lo almacenará en un registro.
2. El acomodo de los datos, donde la primera y última trama indicarán el código del parámetro a reconfigurar y los datos centrales indicarán el valor del parámetro.
3. El almacenamiento de estas tramas, es controlado mediante la FSM y el contador. Cuando se han recibido las 7 tramas se verifica que COD1 = COD2, si esta condición no se cumple no se activa el multiplexor, de lo contrario se manda almacenar el dato en el registro que le corresponda.

En la figura 11 se pueden observar los diversos componentes del módulo de recepción, entre ellos el módulo RS232, un contador, un comparador, una FSM, un multiplexor y registros. Las señales de salida son de un tamaño de 40 bits cada una, 36 bits para números enteros y 4 bits para decimales en caso de los coeficientes (XA0, XA1, XA2, XB1, XTS, YA0, YA1, YA2, YB1, YTS) y de 40 bits de números enteros para DX, DY.

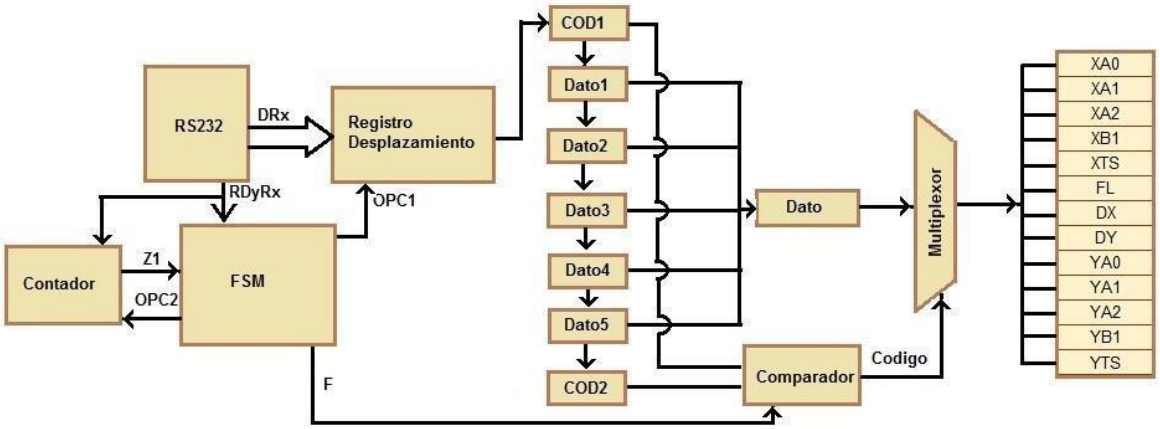


Figura 11. Diagrama a bloques de la arquitectura de Reconfiguración del sistema de control.

2.4.3 Monitoreo del sistema de control

La arquitectura del sistema de monitoreo se muestra en la figura 12, y está compuesta por un temporizador, una serie de registros para almacenar las señales que se van a transferir, un registro de desplazamiento para enviar tramas de 8 bits hacia el módulo de transmisión del RS-232 y una FSM que comanda el funcionamiento de toda esta unidad. La transferencia hacia la PC se realiza cada 0.25 y la trama completa por cada una de las señales a transmitir es de 40 bits.

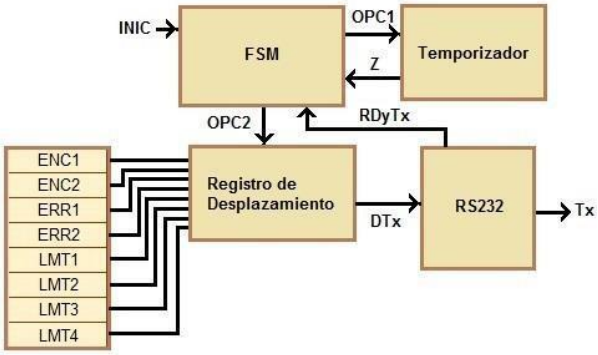


Figura 12. Diagrama a bloques del monitoreo del sistema de control.

2.5 *Controlador PID*

El controlador PID se encarga de brindarle la señal de referencia a los servocontroladores. La estructura digital del controlador está compuesta por el cálculo de la señal de error, el controlador PID y el controlador del actuador. La estructura digital PID se describe en la figura 13, en donde el bloque consta de varios registros que reciben la señal de error de datos, la señal de retroalimentación y los coeficientes de control. El bloque MAC (Acumulador Multiplicador) realiza la multiplicación, sumando funciones y acumulando la señal de salida del controlador.

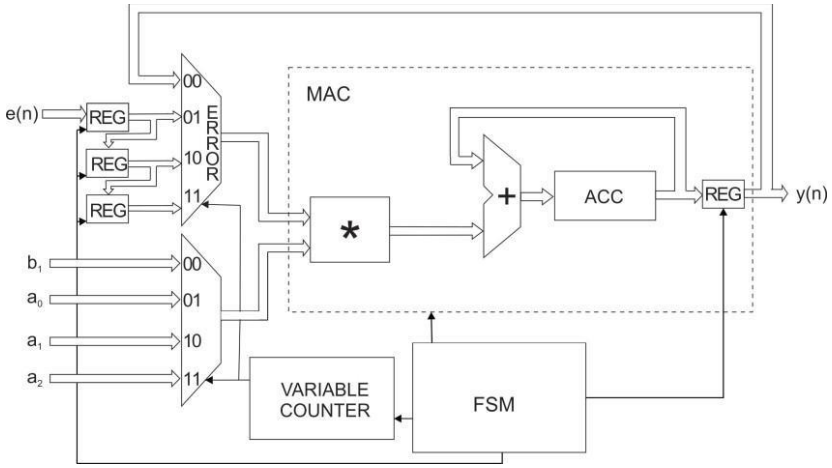


Figura 13. Estructura digital del controlador PID.

3. Resultados

En esta sección se muestran los resultados de la interfaz gráfica, en la figura 14 se puede observar el valor de los coeficientes para ambos servomotores obtenidos mediante el método de sintonización de frecuencia los cuales son: A0=4552.6, A1=-9051.2, A2=4496.7, B1=1 por lo tanto la ecuación de diferencias del controlador seria la siguiente:

$$Y(n) = (Y(n-1) + 4552.6e(n) - 9051.2e(n-1) + 4496.7e(n-2) \quad (1)$$

Las gráficas de la figura 14 obtenidas de la interfaz representan el valor del encoder y del error en tiempo real del robot. La interfaz indica que si la gráfica del encoder del motor X crece positivamente el robot se está moviendo dicha cantidad de pasos a la derecha, y por lo contrario si decrece negativamente nos indica que el robot se está moviendo dicha cantidad de pasos a la izquierda; Respecto al motor Y sucede lo mismo solo que se mueve dicha cantidad de pasos hacia arriba si la gráfica del encoder crece positivamente o hacia abajo si la gráfica del encoder decrece negativamente.

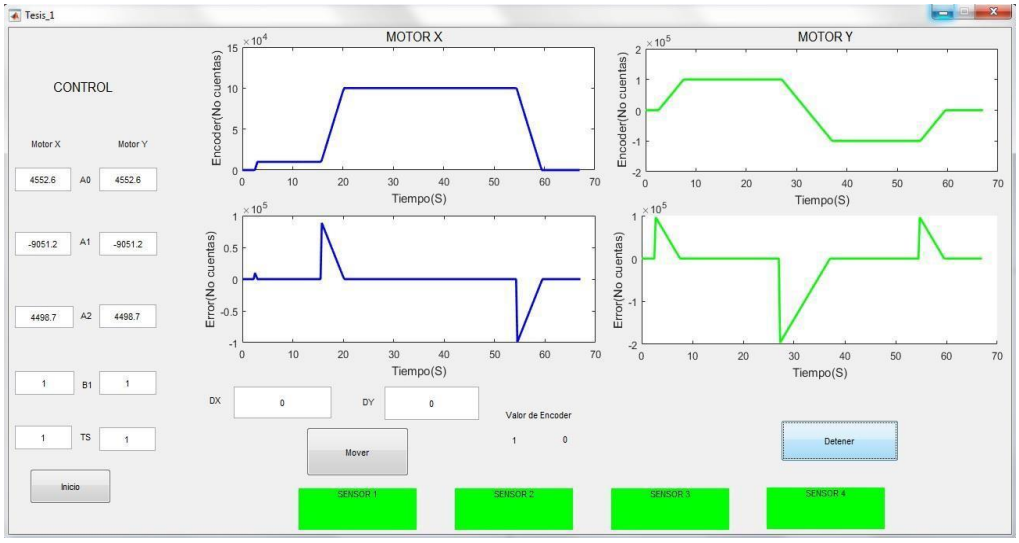


Figura 14. Interfaz gráfica en ejecución.

Referente al consumo de hardware de estas arquitecturas, se puede decir que el consumo de recursos del FPGA es muy bajo, ya que en base al reporte de síntesis obtenido con el software Quartus II se pudo ver que solo se consumen menos del 9% de las unidades lógicas del FPGA Cyclon II de

Altera. Cabe destacar que la máxima frecuencia de operación es de 198 MHz, con lo cual se logra tener una arquitectura muy eficiente, que se puede integrar al sistema de control embebido del robot sin que afecte al desempeño y al consumo de recursos del FPGA.

4. Conclusiones

En este trabajo se construyó e instrumentó un robot cartesiano para poder manipularlo a través de una interfaz gráfica con un bajo consumo de recursos computacionales. Entre las características del robot se encuentran: tiene dos grados de libertad, el espacio de trabajo se encuentra delimitado por cuatro sensores infrarrojos y la posición de cada eslabón se realiza mediante un encoder. Por otro lado, una de las principales aportaciones que se pueden destacar de este proyecto, es la propuesta de un protocolo de comunicación basado en la codificación de tramas de datos, el cual tiene la finalidad facilitar la manipulación de todos los parámetros que requieren para poder controlar los dos eslabones del robot, como son coeficientes de los controladores, frecuencia de muestreo, monitoreo de sensores de limite, señal de error del controlador y señal de encoder. Este protocolo se basa en la recepción de siete tramas, de las cuales la primera y la última indican un código que activará un registro que almacenará alguna de las variables a manipular del sistema embebido, de esta forma la interfaz gráfica puede interactuar fácilmente con el sistema control del robot.

Por consiguiente, utilizando la interfaz gráfica este proyecto puede orientarse a mejorar el desempeño del alumno para poner en práctica los conocimientos adquiridos en las unidades de aprendizaje como control continuo y control discreto lo cual puede generar ideas para poder emprender en estas áreas.

Cabe mencionar que este proyecto es una de las primeras etapas requeridas para lograr obtener un robot cartesiano con características similares a las de los didácticos comerciales, los cuales cuentan con sistemas integrados para diseño de trayectorias con perfiles de velocidad, sistemas de identificación automática, sistema de sintonización para los controladores, sistemas de visión, diferentes tipos de sensado, efectores finales, entre otros. Por lo tanto, como prospectivas del trabajo es integrar los sistemas mencionados en este párrafo, con la finalidad de poder explorar nuevas líneas de investigación referente a estas áreas y poder generar un producto competitivo que abra caminos para el emprendimiento del producto.

Referencias

[1] J. L. Juvinao Gallor, “Desafíos guberlocal conforme a las políticas públicas de emprendimientos e innovación de proyectos tecnológicos en la localidad de Fontibón”.
[2] A. Barrientos, L. F. Peñin, C. Balaguer, R. Aracil, “Fundamentos de Robótica”, Editorial: McGraw-Hill, Segunda edición, ISBN: 978-844-81-5636-7.
[3] A. Ollero Baturone, “Robótica Manipuladores y Robots Móviles”, Editorial: Marcombo S.A., Edición, ISBN: 978-842-67-1313-1.
[4] I. CaparrosoOlier, “Una Introducción a la robótica industrial”, Revista de la facultad de ingeniería, p.p. 53-67, 1999.
[5] A. Sánchez “Diseño y construcción de un brazo robot articulado de seis grados de libertad”, Tec-Magazine, Instituto Tecnológico Superior de Tepeaca, vol. 1, no. 3, pp. 171-184, 2011.
[6] A. K. P. Hernandez, C. S. R. Rojas, E. R. R. Martínez, H. R. B. Ramos, J. M. C. Chávez, & J. A. L. Jimenez, “Plataforma robótica interactiva como estrategia para el fomento del estudio de la ingeniería”. In WEEF 2013 Cartagena, 2013.

[7] T. Bojko. “Educational Cartesian Robot Based on Linear Drives,” In 4dt International Workshop on Robot Motion and Control, pp 203-208, 2004.
[8] R. D. Godoy Hernández, W. Rodriguez Quintero, “Diseño y moldeamiento de un Robot Cartesiano para el posicionamiento de piezas,” Tesis de licenciatura, Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería, 2007.
[9] A. F. Mena Rivas, “Propuesta de diseño de un manipulador cartesiano,”. Tesis Licenciatura, Universidad EAN Bogotá, Facultad de Ingeniería, 2010.
[10] J. L. López Segovia, S. M. Alamilla, J. F. Domínguez Vázquez, “Robot Cartesiano: seguimiento de trayectorias irregulares arbitrarias mediante computador”, Tesis Licenciatura, Universidad Autónoma del estado de Hidalgo, Facultad de Ingeniería, 2007.
[11] F. H. Barteit, D. Meyer, M. Mittnacht, A. Novak, G. S. Mahlknecht, “Optimized control methods for capturing flying objects with a Cartesian Robot. In Robotics,” in IEEE Conference on Automation and Mechatronics, pp. 160-165, 2008.
[12] Y. D. Zhang, J. G. Jiang, T. Liang, “Structural design of a cartesian coordinate tooth-arrangement robot,” In International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), vol. 2, pp. 1099-1102, 2011.
[13] R. González, L. Hernández, E. Izaguirre, E. Rubio, “Estrategia para robots manipuladores con retroalimentación visual y plataforma electro-neumática de 3gdl”, Ingeniería Mecánica. vol. 14, no. 3, p. 245-257, 2011.
[14] A. Gutiérrez, M. Artega, “Control Cartesiano de Robot Manipuladores sin modelo dinámico y sin medición de velocidad,” XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático (CLCA), Cancún, Quintana Roo, México, 2014.
[15] B. Ordoñez, A. Mora, “Diseño de una interfaz gráfica para el modelado de redes inalámbricas de banda ancha,” Tesis Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2006.
[16] C. Parga, “Desarrollo de una interfaz hombre-máquina usando Smartphone con aplicación a brazo manipulador,” Tesis Maestría, Centro de investigación y estudios avanzados del instituto Politécnico Nacional, 2013.
[17] Robot ASRS (Automatic Storage & Retrieval System) Url: http://www.mtabindia.com/manufacturing%20automation/asrsmanufacturingautomation.htm
[18] DCM50xxx/57xxx Series DC Brush Servo Motors, Leadshine Technology, Inc. Url: http://www.leadshine.com.ua/pdf/dcm_datasheet.pdf
[19] E18-D80NK-N Adjustable Infrared Sensor Switch Manual, Url: http://www.electronicaestudio.com/docs/SHT-015d.pdf

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 17, pp. 214 – 222
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Procedimiento para el diseño de un sensor lineal para diversas aplicaciones

Ibañez Olvera Mario, Jaramillo Sierra Bethsabet, Yañez Badillo Hugo, Pérez Carbajal José Adrian

TecNM – Tecnológico de Estudio Superiores de Tianguistenco
mario_mecatronica@test.edu.mx

Resumen

En el presente trabajo se realizó el diseño de un sensor lineal empleando el método de elemento finito, limitándose únicamente a la parte de simulación, sin realizar pruebas físicas ni análisis a los costos de producción del mismo. El sensor lineal funciona bajo el principio de inducción electromagnética, el cual explica cómo un campo magnético puede producir una corriente eléctrica (inducida) al atravesar una bobina. De este modo es posible obtener la lectura de un ángulo, posición o de una distancia vertical u horizontal, al realizar la medición de la corriente entregada por una bobina, la cual contiene en su interior un imán que se desplaza linealmente como reacción al movimiento generado por el objeto o mecanismo a medir. Como primer paso para el desarrollo del sensor lineal se obtiene el modelo 3D empleando el software ANSYS debido a la practicidad que este presenta y nos permite evadir los posibles problemas de compatibilidad relacionados con las extensiones de los CAD debido a que este es generado dentro del mismo software, una vez generado el modelo, se agregaron los materiales y los atributos particulares como las entradas, salidas, tiempos, distancias y velocidades, las cuales son únicamente hipotéticas debido a que este proyecto se centra en la base del sensor lineal y no en una aplicación específica. Como resultado se obtiene la animación del movimiento del imán y la gráfica que describe el comportamiento a través del tiempo de la corriente inducida por el imán sobre la bobina.

Palabras clave: Inducción, Campo electromagnético, Sensor, Corriente, Imán, Bobina.

1. Introducción

La simulación numérica es una herramienta que nos permite predecir el comportamiento de un dispositivo, producto o proceso, ante diversos fenómenos físicos, de este modo podemos saber si va a presentar fallas, y así poder realizar modificaciones y correcciones para mejorar el desempeño. El método que se emplea para realizar las simulaciones numéricas es el de elementos finitos, el cual es un método numérico que divide la geometría en partes de menor tamaño, logrando una aproximación de mayor exactitud [1].

ANSYS es un software de simulación de elementos finitos y dinámica de sólidos que permite analizar y resolver problemas complejos en una amplia variedad de industrias, en específico, el producto ANSYS Electronics permite dar soluciones de simulación electromagnética, electromecánica, térmica y de integridad de señal [2].

Sensor: Dispositivo que detecta una determinada acción externa, temperatura, presión, etc., y la transmite adecuadamente [3].

La inducción electromagnética explica cómo un campo magnético puede inducir una corriente eléctrica y, de manera inversa, cómo una corriente eléctrica crea un campo magnético a su alrededor [4].

Las corrientes de Foucault o corrientes Eddy, son el producto de la inducción electromagnética, en donde un campo magnético variable produce una f.e.m. que hace circular una corriente por el material conductor [5].

2. Experimental

2.1 Propuesta de aplicación para el sensor lineal.

Una propuesta para la aplicación del sensor lineal se basa en la medición de la posición de una llave mariposa, en la cual, es posible implementar el sensor externamente con el eje de rotación y la ayuda de un pequeño vástago sujeto al imán como se muestra en la figura 1.

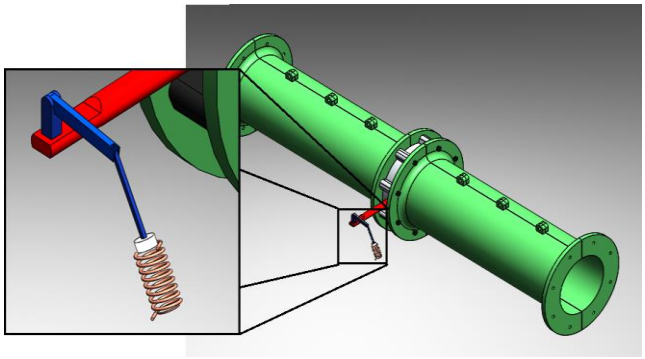


Figura 1. Implementación del sensor lineal.

La figura 2 permite observar cuatro momentos de la apertura de la llave de mariposa y el recorrido del imán, iniciando con la llave de mariposa completamente cerrada y el imán sin ingresar a la bobina (inciso a), hasta llegar a la apertura completa de la llave de mariposa y con el imán fuera de la bobina (inciso d).

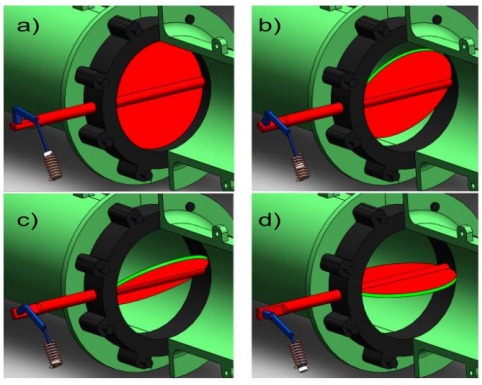


Figura 2. Apertura de la llave de mariposa.

Es importante mencionar que; el sensor lineal no se encarga de otorgar movimiento al eje de la llave de mariposa, únicamente da la lectura de su posición como resultado de amplificar la corriente inducida que proporciona la bobina.

2.2 Diagrama de flujo para el proceso de simulación.

Un proceso típico de simulación consta de una metodología en la cual se tiene en cuenta una serie de pasos, los cuales son: preprocesamiento, solución y posprocesamiento.

Preproceso: Es la parte inicial de la metodología que se encarga del modelado de la geometría (o una representación del sistema), también se encarga de asignar las propiedades físicas del diseño (materiales) y las unidades con las cuales se estará trabajando.

Solución: Es la parte media de la metodología, encargada de agregar las excitaciones y configurar la solución de la simulación.

Posproceso: Es la parte final de la metodología, en ella se arrojan los resultados y los gráficos que se generan al concluir la simulación para, posteriormente, interpretar dichos resultados.

2.3 Análisis del sensor lineal en 3D.

Para el análisis del sensor lineal, se comenzó con el desarrollo del CAD, el cual consta de 4 elementos descritos a continuación:

a) Bobina: Elemento conductor por el cual se trasmitirá la corriente inducida.
b) Imán de neodimio: Es el encargado de generar el campo magnético.
c) Vástago o elemento mecánico: El componente simula el mecanismo al que estará sujeto y el cual se encargará de otorgar el movimiento al imán.

d) Banda: Representa la zona de desplazamiento para el recorrido del imán.

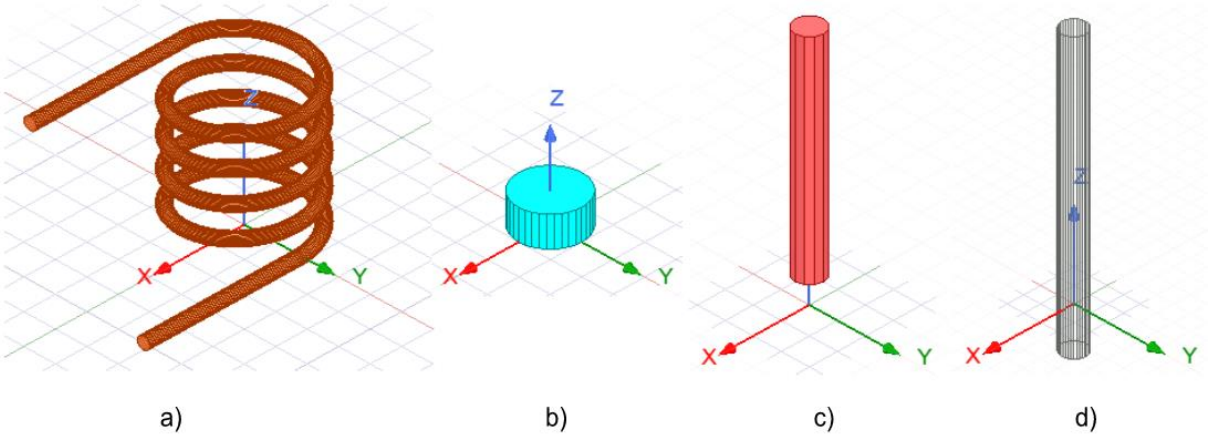


Figura 3. Elementos del sensor lineal.

Los elementos que conforman el sensor lineal fueron asignados con los materiales descritos en la tabla 1.

Tabla 1. Materiales empleados.

Elemento	Material	Material en ANSYS
Bobina	Cobre	Copper
Imán	Neodimio	NdFe35
Banda	Vacío	Vacuum
Vástago	PVC	PVC plastic

El elemento “bobina” cuenta con 4.5 espiras y 0.4 cm de diámetro para su sección transversal, se le agregaron dos terminales, la primera se colocó sobre la sección transversal que corresponde al inicio del conductor; configurándola con una dirección de entrada, y la segunda sobre la sección transversal final de la bobina; con dirección de salida, como se muestra en la figura 3.

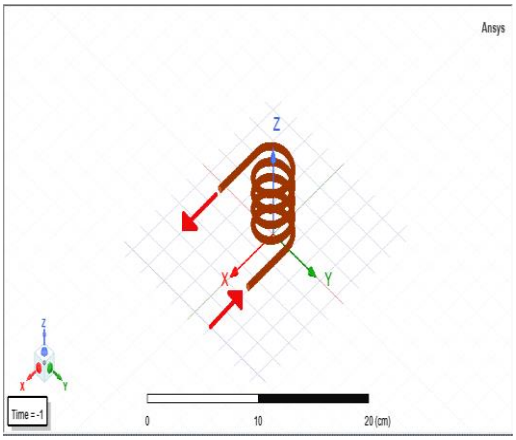


Figura 4. Configuración de la entrada y salida de la bobina.

El elemento “imán” cuenta con un diámetro de 2 cm y 1 cm de altura, ubicado de manera concéntrica a la bobina y banda.

Para la creación de la banda se diseñó un cilindro con 30 cm de altura y 2.8 cm de diámetro, al cual se le configuró el tipo de movimiento a traslacional, posición inicial de -1, límite inferior de -1, límite superior de 15 y una velocidad de 6 cm por minuto.

En el apartado de excitaciones se agregó un embobinado, el cual contará con una entrada de tipo externo y sólido. La entrada externa que se asignó es un circuito físico conformado por una bobina; esta se encuentra por defecto seguido de la creación del elemento “bobina”, una resistencia de 100 ohm y un GND como se muestra en la figura 3.

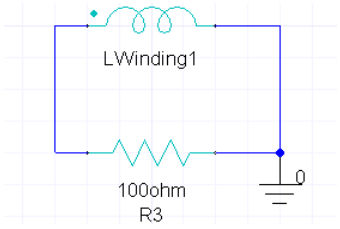


Figura 5. Configuración del embobinado.

Posteriormente se asignó una excitación más a la bobina, llamada “Efectos de Eddy”, siendo este el fenómeno responsable de las corrientes resultantes.

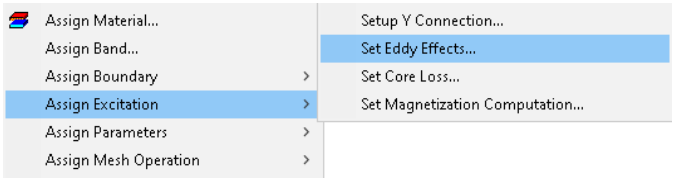


Figura 6. Asignación efecto Eddy.

En la configuración del enmallado, se seleccionó la banda y se agregó una operación de malla basado en longitud, en esta operación se desmarca la opción que establece la longitud máxima del elemento y se marcó la casilla de número máximo de elementos adicionales, manteniendo el valor que aparece en automático como se muestra en la figura 7.

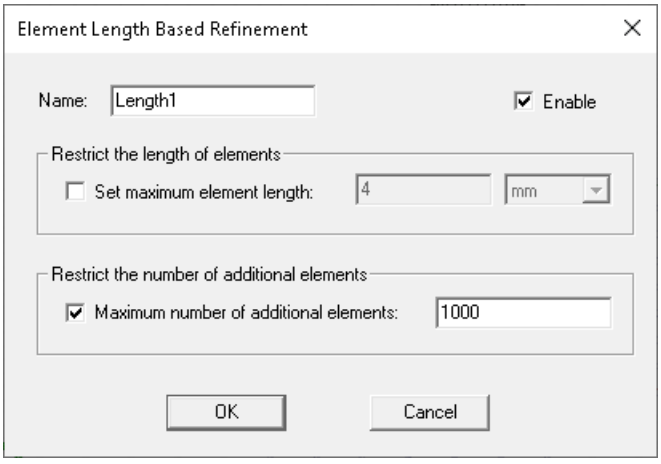


Figura 7. Configuración de los parámetros de malla.

Una vez realizada la operación de enmallado, se generó la configuración del análisis, en la cual, se contempló un tiempo límite de 1 segundo que se dividiría en 10 partes, por lo que se asignó un *step* de 0.1 seg, en el apartado de *save fields* se seleccionó la opción de *every* para que de manera automática se reconocieran las 10 divisiones del segundo, y después se marcó la casilla *custom*, donde se puede observar el inicio, el final, y los pasos asignados, la configuración del *setup* se muestra en la figura 6.

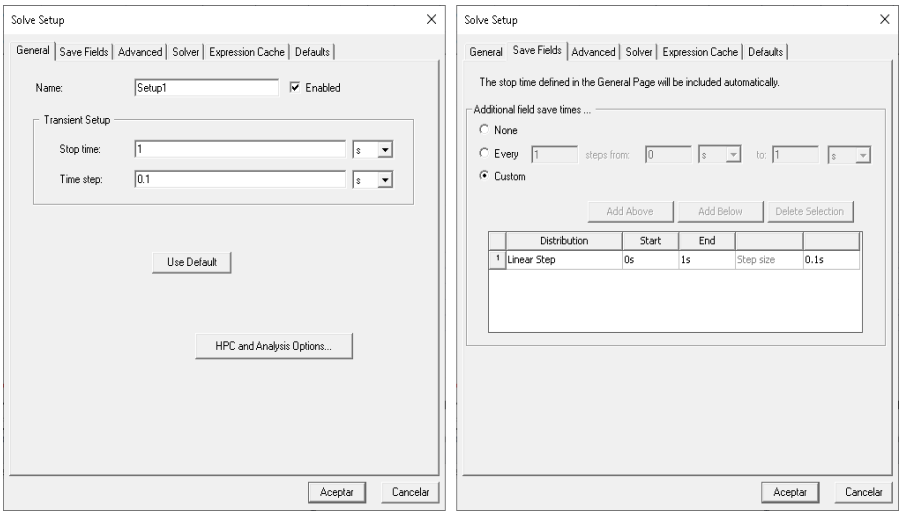


Figura 8. Configuración del *setup*.

Previo a comenzar con la simulación del *setup*, se corroboró que las asignaciones y propiedades que se añadieron a nuestro modelo son correctas, esto es posible con la opción de validar, ubicada en el apartado de simulación.

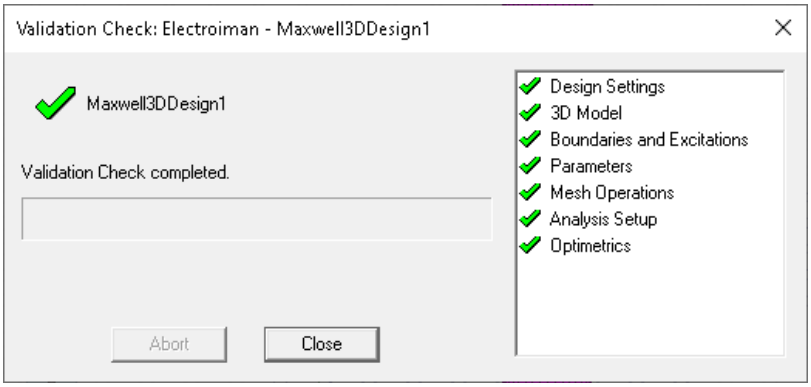


Figura 9. Validación del modelo.

Al observar una validación en donde todos nuestros parámetros están correctos, podemos iniciar con el proceso de simulación para la obtención de resultados.

3. Resultados

La visualización de los resultados inició seleccionando todos los elementos del sensor y el plano sobre el cual se verá reflejado el campo magnético, también es posible observar la gráfica que muestra el comportamiento del sensor lineal a través del tiempo.

3.1 Campo magnético producido en el sensor lineal.

Es posible observar cómo el campo magnético que interactúa en nuestro sistema, es el campo magnético producido por el imán, el mismo que se encarga de inducir la corriente en nuestra bobina, la figura 8 muestra el campo magnético del sistema, el inciso “a” indica el campo magnético en el plano YZ y el inciso “b” representa el campo magnético en el imán.

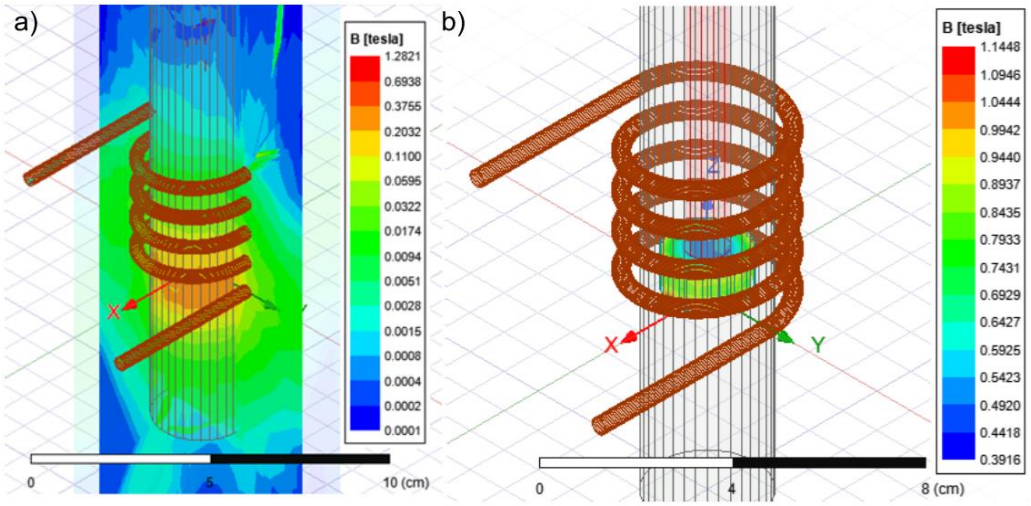


Figura 8. Campo magnético en el sensor.

3.2 Corriente inducida a través del tiempo.

El análisis de un segundo, tomando en cuenta el segundo 0, proporciona una animación dividida en 11 segmentos, la animación representa el desplazamiento del imán en el interior de la bobina induciendo las corrientes de efecto Eddy, esto nos permite relacionar la posición del imán con una corriente. En la tabla 2 podemos observar 5 de los 11 segmentos de la animación, donde:

- La posición del imán en el segundo 0, que hace referencia al inicio del recorrido, pero aun fuera de la bobina, genera una corriente de 0 A.
- La posición del imán en el segundo 0.3, produce una corriente de -3.26 uA.
- La posición del imán en el segundo 0.4, produce una corriente de -1.44 uA.
- La posición del imán en el segundo 0.7, produce una corriente de 2.98 uA.
- La posición del imán en el segundo 0.9, produce una corriente de 6.77 uA.

Tabla 2. Relación de corriente inducida con respecto a una posición

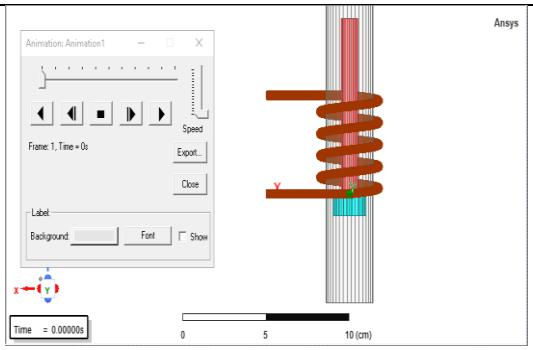
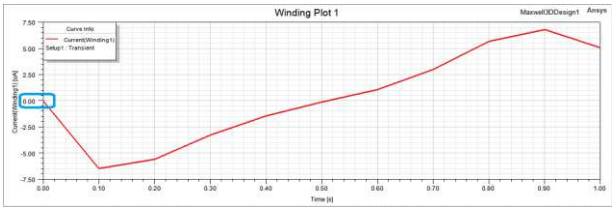
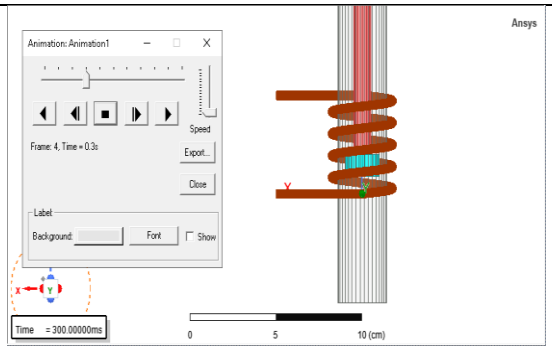
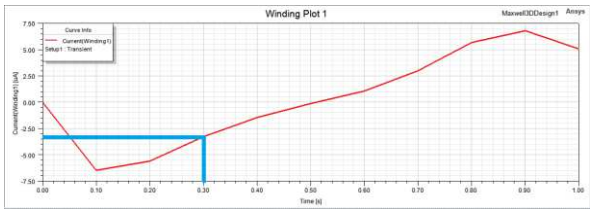
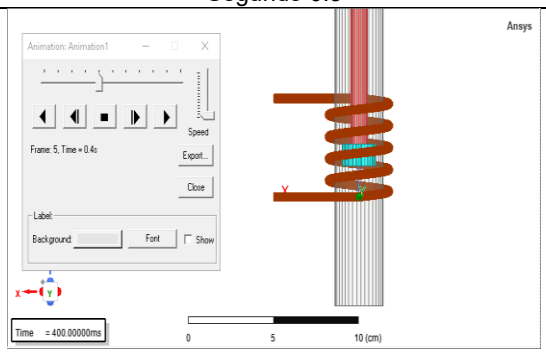
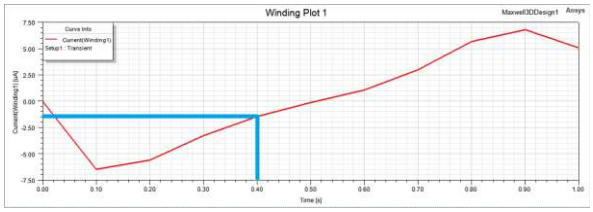
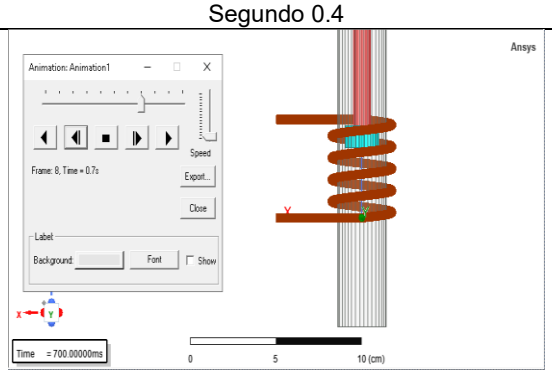
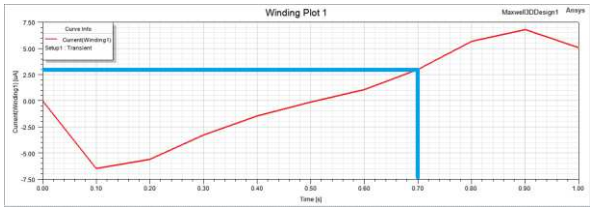
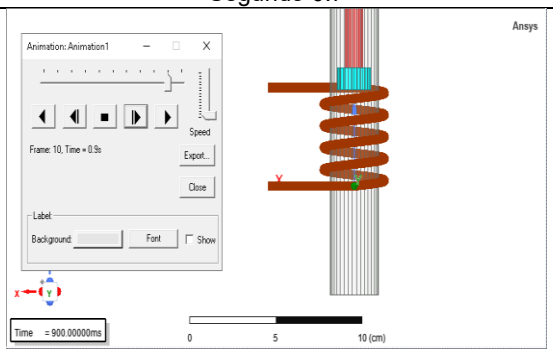
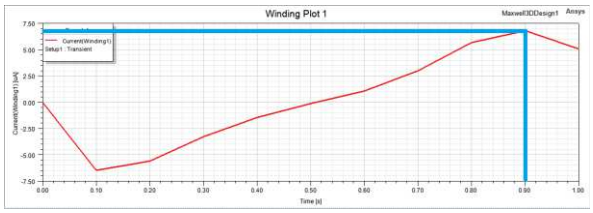
Posición	Corriente
 Segundo 0	 Corriente 0 A.

Tabla 2 (cont.). Relación de corriente inducida con respecto a una posición

 Segundo 0.3	 Corriente -3.26 uA.
 Segundo 0.4	 Corriente -1.44 uA.
 Segundo 0.7	 Corriente 2.98 uA.
 Segundo 0.9	 Corriente 6.77 uA.

La gráfica mostrada en la figura 8 se obtuvo al generar el reporte transitorio de la corriente inducida en la bobina, y representa las corrientes de Eddy obtenidas en el transcurso de un minuto, con los datos de la gráfica se pudo generar una tabla de la figura 9, para la visualización de los datos con mayor precisión.

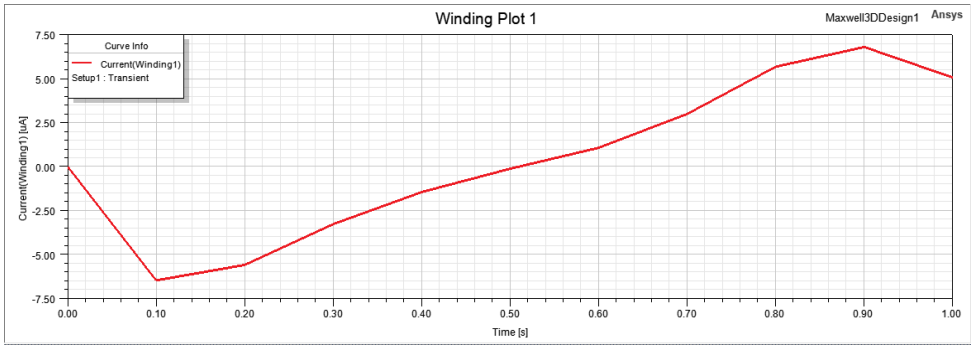


Figura 10. Corrientes de Eddy en función del tiempo.

	Time [s]	Current(Winding1) [uA] Setup1 : Transient
1	0.000000	0.000000
2	0.100000	-6.449746
3	0.200000	-5.575370
4	0.300000	-3.263400
5	0.400000	-1.447465
6	0.500000	-0.122598
7	0.600000	1.064200
8	0.700000	2.982228
9	0.800000	5.655405
10	0.900000	6.770654
11	1.000000	5.042775

Figura 11. Tabla representativa de las corrientes de Eddy en función del tiempo.

4. Conclusiones

Tras el análisis realizado al sensor lineal, conformado por una bobina y un imán, es posible concluir que; el dispositivo cuenta con una gran variedad de aplicaciones relacionadas a la medición de *un ángulo, posición o de una distancia* presentes en piezas móviles, debido a su versatilidad en cuanto a dimensiones es posible adaptarlo a nuestras necesidades.

Referencias

[1] Mirlisenna, G. (2022, 28 noviembre). ¿Qué es el método de elementos finitos y cómo es utilizado en la simulación? ESSS. https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-%20finitos-que-es/

[2] Arkirama. (2023). ANSYS: Qué es, cómo funciona y precios. Arquinétpolis. https://arquinetpolis.com/ingenieriacivil/ansys-como-funciona-y-precios/#:~:text=ANSYS%20es%20un%20software%20de%20simulaci%C3%B3n%20de%20elementos,el%20comportamiento%20de%20un%20sistema%20en%20condiciones%20extremas.

[3] Asale, R.-. (s. f.). sensor | Diccionario de la lengua española. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. https://dle.rae.es/sensor

[4] khanacademy. (2017). ¿Qué es la ley de Faraday?, de ¿Qué es la ley de Faraday? Sitio web: https://es.khanacademy.org/science/physics/magnetic-forces-and-magnetic-fields/magnetic-flux-faradays-law/a/what-is-faradays-law

[5] Perez L., Peralta H., & Bianchi R. (2003). Estudio de las corrientes de Foucault a través del enfoque magnetostático. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 18, pp. 223 – 234
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Diseño de un guardarropa automático para uso residencial

Mirelez Delgado Flabio Darío, Hernández González Umanel Azazael, Moreno Báez Miguel Ángel, Cruz Leija Roberto Oswaldo, Carranza Perales Andrea del Carmen, Ramírez Sánchez Kassandra

Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisiplinaria de Ingeniería Zacatecas
uahernadez@ipn.mx

Resumen

El almacenamiento y acomodo de las prendas se ha realizado de manera manual en hogares y pequeños almacenes, sin embargo, con el avance de las nuevas tecnologías y el crecimiento de la industria textil es conveniente considerar nuevas opciones. En el presente documento se expone el diseño de un prototipo de guardarropa automático que, en conjunto con una aplicación móvil, permita escanear, identificar y trasladar prendas de acuerdo con la elección de un usuario. El diseño planteado consiste en una estructura metálica de forma cilíndrica de un metro y noventa centímetros de altura que cuenta con un aro giratorio en donde tendrá que ser colocada la vestimenta a guardar. El prototipo contará con una aplicación móvil, donde se tendrá una base de datos de la ropa con la que se cuenta, de tal manera que al seleccionar una prenda deseada el mecanismo girará, dejando frente al usuario dicha prenda.

Palabras clave: Identificación, Escaneo, Prenda, Almacenamiento

1. Introducción

La población mundial ha superado recientemente la cifra de 7.8 billones de personas [1]. Las necesidades esenciales para cada persona son la alimentación y el vestido; por lo que la industria textil y de confección forman parte integral en la manera en que la humanidad se debe enfrentar a este crecimiento demográfico. Si se observa el tamaño y la importancia de la industria textil y de confección, en comparación con otros sectores industriales de gran realce, ésta sólo es superada por los sectores de la tecnología de la información y turismo [2].

La industria textil es uno de los sectores más exigentes y competitivos del mundo. En últimos años, gracias al crecimiento de las compras en línea, la cadena de suministro del sector se ha tenido que ver mejorada y modificada, lo que implica una logística de mayor elaboración y el diseño adecuado para la construcción de grandes centros de distribución, para cumplir con los pedidos realizados por parte de los consumidores en el menor tiempo posible. Para esto, será imprescindible tener almacenes eficientes y optimizados [3], que permitan el flujo correcto de los productos, logrando así la competitividad en el mercado, además de efectuar el principio “Just in time” [4].

Por otro lado, el orden y la organización son fundamentales en cualquier aspecto de la vida cotidiana, por lo que el correcto y buen almacenamiento de los productos textiles y las prendas de ropa, no es la excepción. Es de gran importancia una correcta administración y organización en los almacenes de la industria textil, ya que, al aprovechar el mayor espacio posible con una buena ruta de paso para la circulación de los productos, se podrá optimizar el flujo de entradas y salidas del almacén, reduciendo los plazos de tiempo de manipulación de la mercancía [4].

Ante esto, la creación y construcción de un sistema capaz de escanear, identificar y trasladar prendas de manera automática, generará grandes beneficios a la organización y almacenamiento de las distintas prendas de ropa en la industria textil [5]. Por otro lado, reduciendo de manera significativa la cantidad de prendas por organizar y almacenar, además de centrarse en la necesidad de cada persona por tener un sistema de acomodo y guardado de prendas en sus hogares, se pueden generar grandes ventajas y soluciones a los problemas de este tipo a los que se enfrentan las personas día con día. De acuerdo con una encuesta realizada a mil mujeres por la empresa estadounidense Closetmaid [6]:

- Una mujer cuenta en promedio con 103 prendas en su armario, pero, solo usa alrededor del 10% de ellas, considera un 21% como no usable, un 33% demasiado ajustado y un 24% demasiado holgado.
- Considerando los datos obtenidos se llegó a la conclusión de que el 80% de las veces probablemente sólo se usará el 20% de la ropa.
- Cerca de un 35% de las mujeres acomoda su ropa en ganchos, así que usan más del 20% de las prendas con las que cuentan, gracias a la organización.
- La desorganización y la acumulación de objetos alrededor del hogar pueden crear la sensación de caos y estrés en la vida y su familia. Los clósets le ayudan a ordenar, dejando, además, los distintos objetos a su alcance.

Un guardarropa automático como el que se propone en el presente trabajo, con un sistema de escaneo e identificación, además, con la capacidad de almacenar y trasladar las prendas podrá solucionar las problemáticas expresadas anteriormente; es decir, permitirá optimizar el espacio, facilitando el acceso a las prendas de manera ordenada y acortando tiempos de búsqueda de prendas. Además, la aplicación del guardarropa, al ser amigable con el usuario, facilitará el uso del prototipo y permitirá observar toda la ropa almacenada, seleccionarla y obtenerla, manteniendo siempre un orden adecuado de las prendas.

2. Metodología

Para el desarrollo de esta propuesta, se diseñó un prototipo de closet automático con dimensiones de 1.80 m de altura y 1 m de diámetro, con capacidad de almacenamiento mínimo a 20 prendas. Con este sistema se podrá realizar el escaneo e identificación de prendas de ropa; mediante una aplicación móvil se podrá seleccionar la vestimenta deseada, para después ser proporcionada al usuario por el mecanismo. Una vez seleccionada la prenda y si se encuentra disponible en el guardarropa por medio de un mecanismo será entregada al usuario. En caso de que el usuario solicite una prenda y esta no se encuentre disponible se indicará por medio de la aplicación. La aplicación se diseñó para contar con una base de datos donde se podrá dar de alta y baja distintas prendas y tener mejor control del guardarropa. La comunicación de la aplicación con el guardarropa se realizará mediante comunicación inalámbrica para que sea más cómodo de usar.

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 (del inglés *Integration Definition for Function Modeling*) para poder definir el proceso que realiza el guardarropa automático como se muestra en la Figura 1.

2.2 Diseño Mecánico

En la figura 2 se muestra la estructura del guardarropa, la cual consiste en 4 soportes y una base donde se colgarán las prendas, la cual girará mediante un motor. Entre las principales consideraciones que se tomaron en cuenta para las dimensiones de la base fija se encuentran las dimensiones de la base giratoria y la ubicación de los soportes, ya que es fundamental para el correcto funcionamiento y movimiento de la estructura.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 18, pp. 223 – 234
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

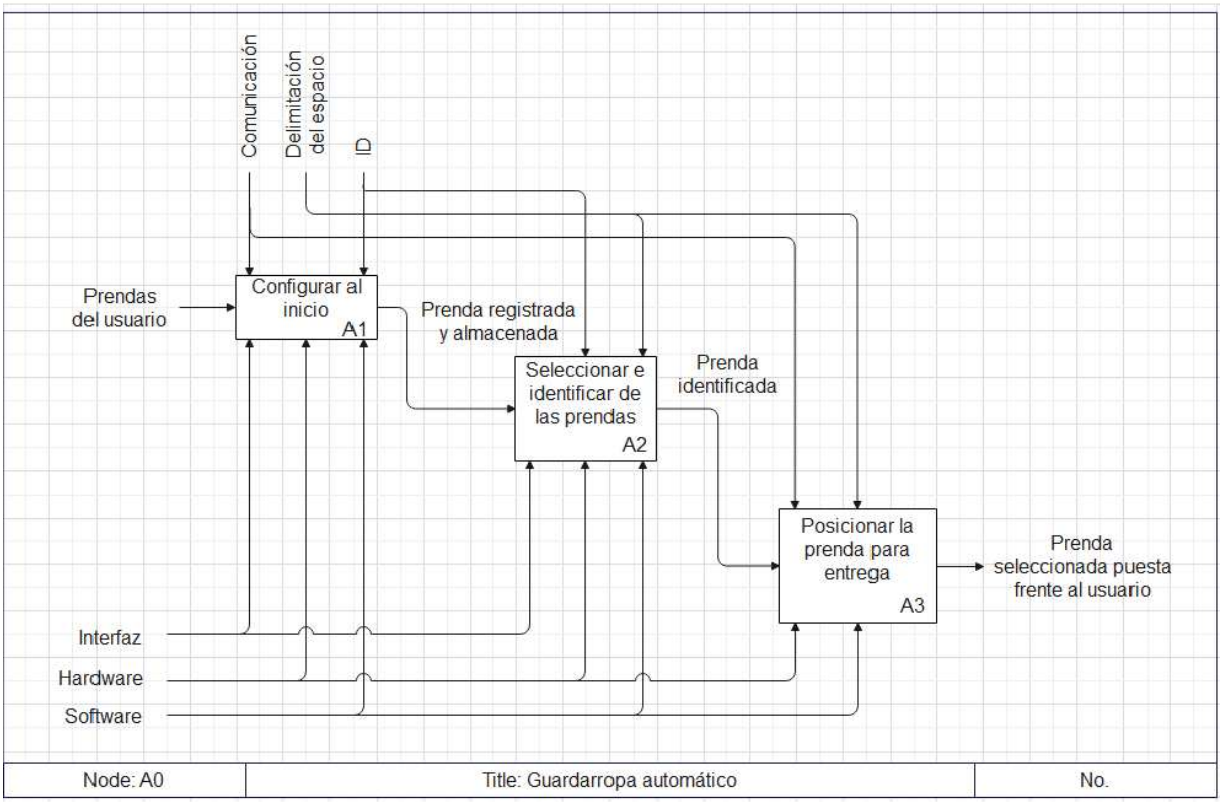


Figura 1. Diagrama A0. Proceso de selección e identificación de las prendas.

Para el dimensionamiento de la base giratoria se midieron ganchos con distintas prendas, se les agregó un margen de 5 cm por lado para evitar que las prendas se encuentren en contacto. El gancho con una chamarra de las que se emplearán en las pruebas del prototipo es de aproximadamente 60 cm, por lo tanto, se le debe asignar un espacio de 70 cm de forma horizontal (visto de la parte superior) a cada prenda. Los soportes del guardarropa se diseñaron de forma que las prendas queden colgadas a una distancia superior a 1.65 m respecto al piso y el gancho. Además, las pequeñas fisuras en la parte superior se diseñaron para permitir que el soporte de componentes sea desmontable y facilitar el acceso a los componentes eléctricos y electrónicos.

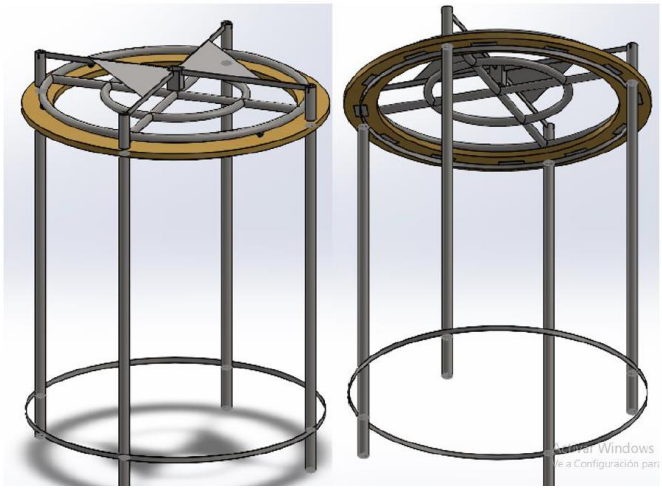


Figura 2. Estructura del Guardarropa.

2.3 Diseño Electrónico

Para el sistema eléctrico/electrónico del prototipo se emplearon algunos elementos como:

- Motores a pasos (23HP45-4204S) con su controlador (Driver DM542T).
- Microcontrolador Raspberry Pi y ATMega2560.
- Fuente de voltaje regulable HJS-480-48

Se consideró utilizar un motor a pasos en el sistema, que permita colocar la prenda seleccionada enfrente del usuario de manera precisa, debido a que brinda buena exactitud al girar, además que tiene un costo accesible. Para calcular del par requerido se emplearon (1) y (2) [7].

$$T \cdot \omega - \sum \tau \cdot \alpha \cdot \omega = 0 \tag{1}$$

$$J_T = j + \sum (J_n + m \cdot d^2) \tag{2}$$

Donde:

- m=$masa$
- d=$radio\ de\ la\ circunferencia$
- J=$Inercia\ total$
- $Jn = masa\ puntual$
- ω =$velocidad\ angular$
- α= $aceleración\ angular$

Sustituyendo se tiene:

$$J_T = 2.2417 + 20(1.61 \cdot 0.35^2) = 6.1617\ kg * m^2 \tag{3}$$

$$T = \Sigma J \cdot \alpha = (6.1617)(0.10833) = 0.6675\ Nm \tag{4}$$

El par necesario para el sistema es de 0.6675 Nm a una velocidad angular de 0.1083 rad/s^2 y una aceleración angular α =0.108330781 rad/s^2. Se considera optar por un factor de seguridad de cuatro, por las cuestiones de fricción que no se hayan tomado en cuenta y si en el desarrollo del proyecto se decide aumentar un poco la velocidad, ya que a mayor velocidad el par requerido se incrementa. En la figura 3 se muestra el esquema completo de conexiones del sistema.

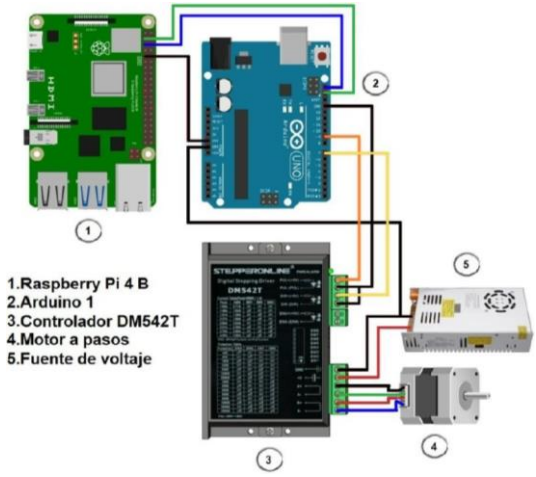


Figura 3. Diagrama electrónico de conexiones.

Para la realización de las conexiones, se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

- La Raspberry Pi mandará una señal al Arduino sobre cuál fue la prenda elegida, por lo que se decide establecer una comunicación I2C, conectando así los pines de SDA y SCL de ambos componentes, sin olvidar que la conexión de las tierras debe ser común.

- Las conexiones entre Arduino y el driver del motor se rigen por una señal PWM que corresponde al avance según la cantidad de pulsos que reciba y de una señal digital encargada de dar el sentido de giro.

- El controlador DM542T tiene que estar alimentado, por lo que los pines de V+ y GND se conectan a la fuente de voltaje regulable.

2.4 Diseño de Software

Para el guardarropa se desarrolló una aplicación móvil, donde el usuario podrá agregar, eliminar y visualizar las prendas que se tienen en el guardarropa. El primer paso para desarrollar la aplicación es identificar qué es lo que se quiere que realice el software y cómo es que se llevarán a cabo dichas especificaciones [8], por lo tanto, se realiza un análisis de los requerimientos funcionales y no funcionales de la aplicación móvil del guardarropa automático, los cuales se pueden observar en la Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1. Requerimientos funcionales.

Nombre	Nombre corto	Descripción
Agregar prendas	RF1	La aplicación deberá permitir al usuario agregar prendas con la ayuda de un botón.
Eliminar prendas	RF2	La aplicación deberá permitir al usuario eliminar aquellas prendas deseadas con la ayuda de un botón.
Visualización de prendas disponibles	RF3	Se mostrará en forma de catálogo aquellas prendas disponibles para el usuario.
Escaneo de prendas	RF4	La aplicación tendrá que conceder el uso de la cámara del teléfono portable para la toma de la fotografía de la prenda por almacenar.
Selección de prendas	RF5	Se podrá seleccionar la prenda que el usuario desee.

Tabla 2. Requerimientos no funcionales.

Nombre	Nombre corto	Descripción
Almacenamiento máximo	RNF1	Solamente se podrá almacenar los datos relacionados a un máximo de 20 prendas.
Conectividad	RNF2	La aplicación deberá conectarse a un servidor local para lograr su funcionamiento.
Imagen escala de grises	RNF3	En caso de que las prendas hayan sido retiradas del guardarropa, la imagen se convertirá a escala de grises, para hacer hincapié en que la prenda no se encuentra almacenada.
Imagen RGB	RNF4	Muestra la disponibilidad de la prenda, lo que permite ser seleccionada para su retiro.
Almacenamiento en base de datos	RNF5	Las imágenes y los datos de cada prenda deberán guardarse en una base de datos creada en la Raspberry Pi.
Comunicación	RNF6	La aplicación deberá estar en constante comunicación con la Raspberry Pi, ya que, si se pierde, la aplicación dejará de funcionar.

Una vez establecidos los requerimientos, se procede a la elaboración de un diagrama UML de casos de uso, ya que éste permitirá mostrar la relación que existe entre el usuario, el microcontrolador y tales requerimientos [9], el diagrama se muestra en la figura 4.

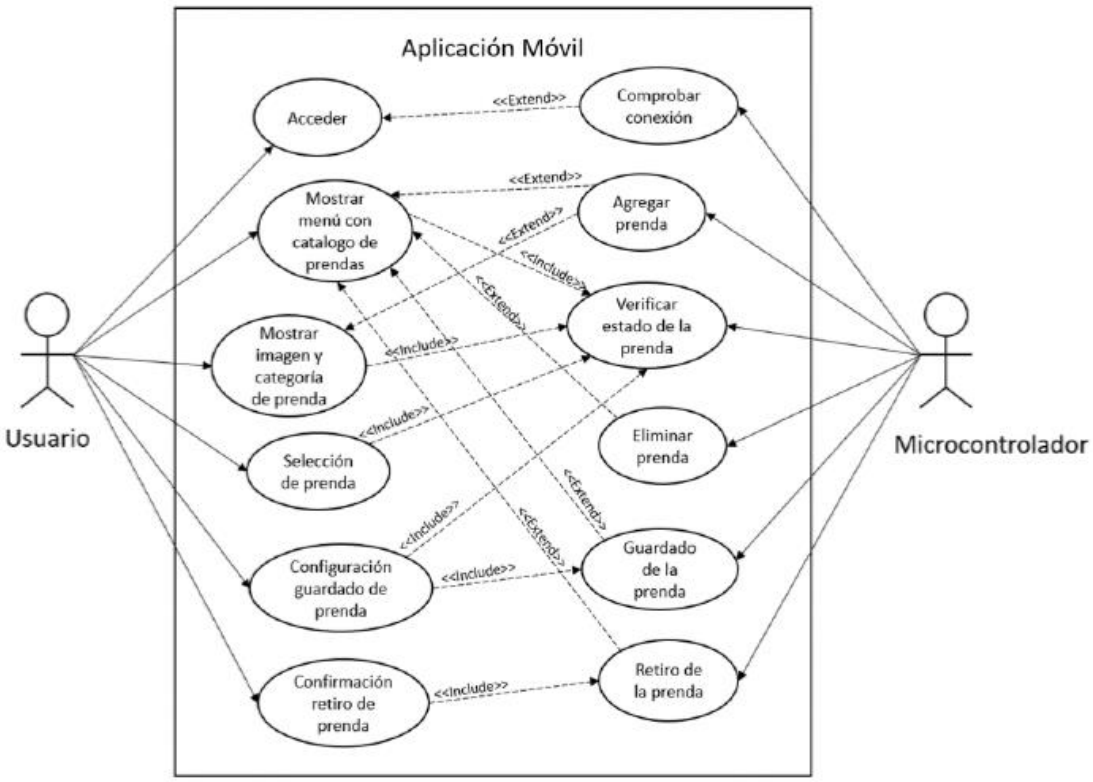


Figura 4. Diagrama UML de casos de uso.

El diagrama de clases de la figura 5, muestra la relación que existirá entre los objetos a programar, de una manera resumida, se tiene lo que se maneja a la entrada y cómo es que se visualizará la disponibilidad de la vestimenta.

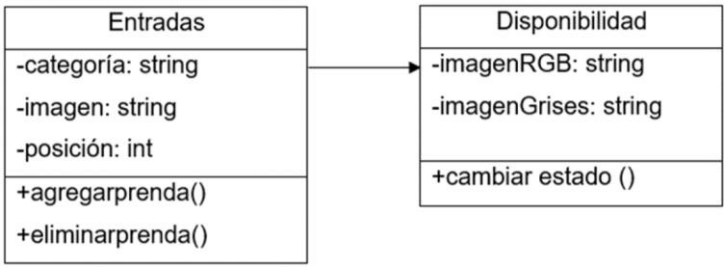


Figura 5. Diagrama de clases UML.

Para una mejor descripción del funcionamiento de la aplicación móvil, se optó por realizar tres diagramas de flujo, los cuales consisten en el arranque de la aplicación, la selección y agregado de prendas. El diagrama de arranque (figura 6) se describe a continuación; habrá un inicio en el cual se muestra una interfaz de inicio, aquí la aplicación tendrá que realizar lo que se denomina como “ping” en informática, ya que si no se realiza no se podrá pasar a la interfaz del menú, una vez encontrado aquí, se procede a la búsqueda de las prendas en la base de datos, en caso de no haber prendas no se mostrará la lista de la ropa disponible para el usuario.

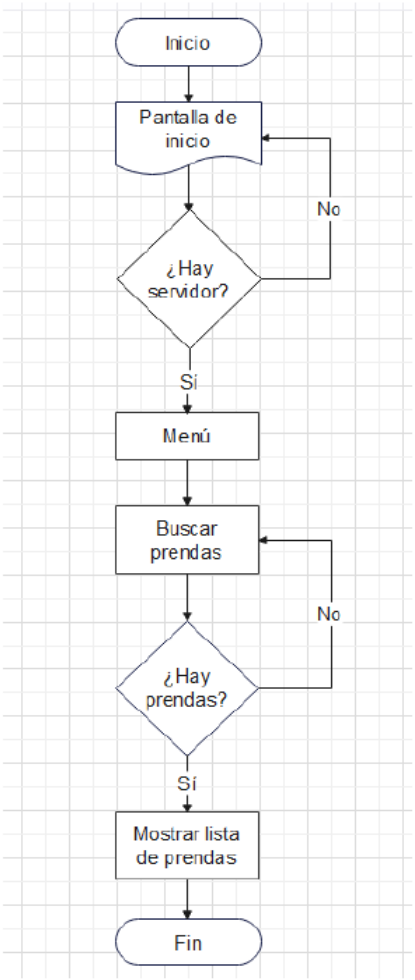


Figura 6. Diagrama de flujo parte uno. Arranque de la aplicación.

El diagrama de flujo de la figura 7, muestra el proceso correspondiente al agregado de prendas. En la aplicación se cuenta con un botón de “agregar”, que cuando se presione activará la cámara del dispositivo móvil para tomar una foto de la prenda a agregar, una vez realizado esto, la aplicación etiqueta la prenda con un ID y solicita al usuario una confirmación de guardado de prenda, en donde se tendrá que seleccionar un botón de “SI” o el botón de “NO”, en caso de una respuesta positiva se manda una solicitud de registro al servidor y después se regresa a la interfaz de menú, en caso contrario, directamente se redirige al usuario al menú principal.

En la figura 8 se muestra el proceso que corresponde a seleccionar una prenda y lo que debe realizarse para indicar en el sistema que se retiró o se añadió, es decir, al momento de que el usuario se encuentre en el paso de estar seleccionando las prendas, la aplicación verificará si se encuentra disponible o no, en caso de que si, ésta se comunicará con el servidor y el sistema hará los demás procesos para colocarla frente al usuario, sin embargo, se pedirá una confirmación de retiro de la prenda, ya que puede pasar que el usuario se arrepienta de la ropa seleccionada; si se confirma la extracción, la prenda la imagen correspondiente en la aplicación cambiará de estatus a una escala de grises (lo que indica que la prenda ya no se encuentra disponible) y la aplicación se retorna al menú principal. En el caso opuesto, que se rechace el retiro, se regresa directamente al menú principal.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 18, pp. 223 – 234
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

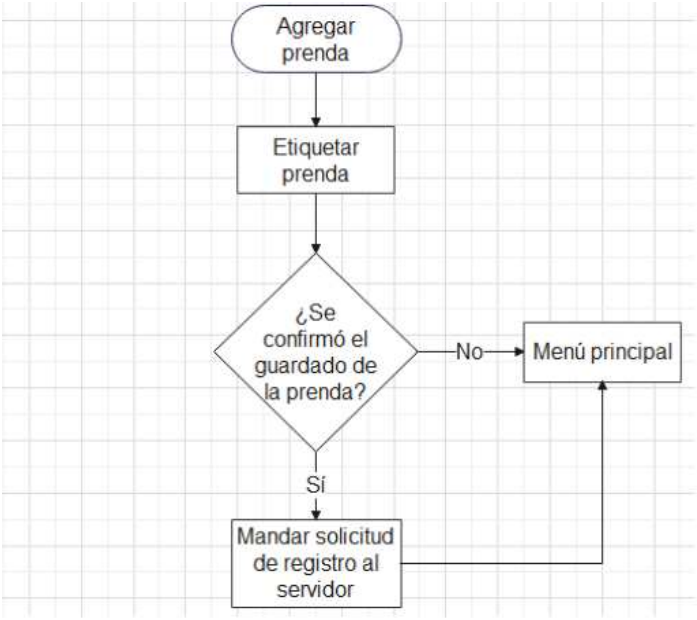


Figura 7. Diagrama de flujo parte dos. Agregar prenda.

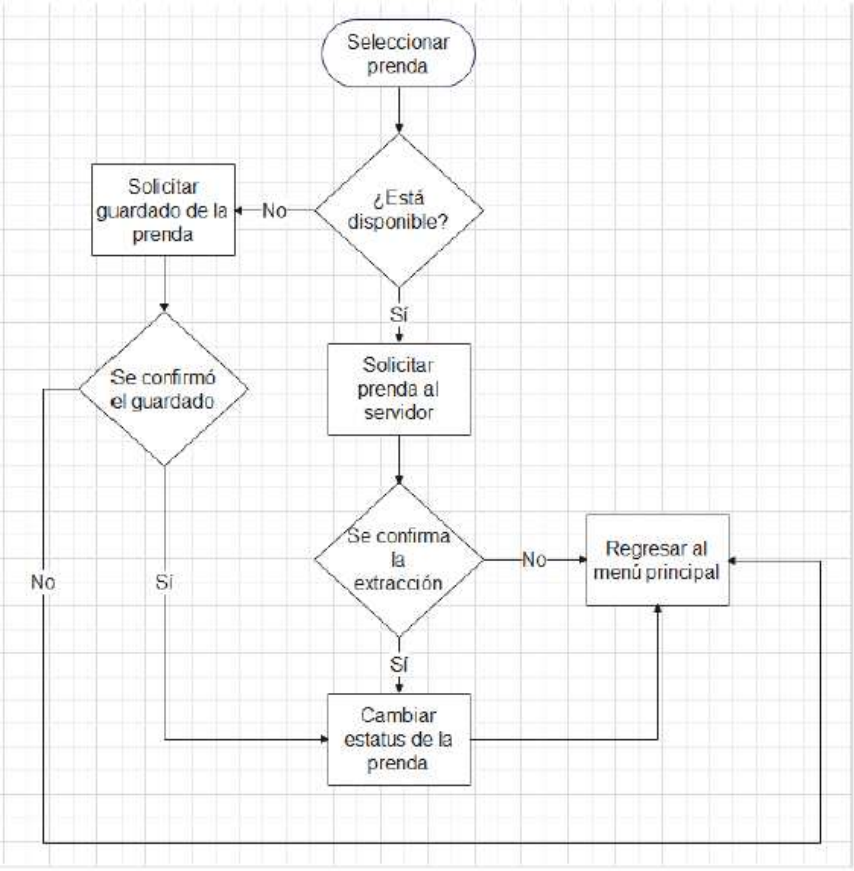


Figura 8. Diagrama de flujo parte tres. Selección de prendas.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 18, pp. 223 – 234
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

3. Resultados

Una vez diseñado el guardarropa se procedió a realizar el ensamble de todos los elementos electrónicos en el diseño CAD para visualizar el diseño final, en la figura 9 se muestra el ensamble final.

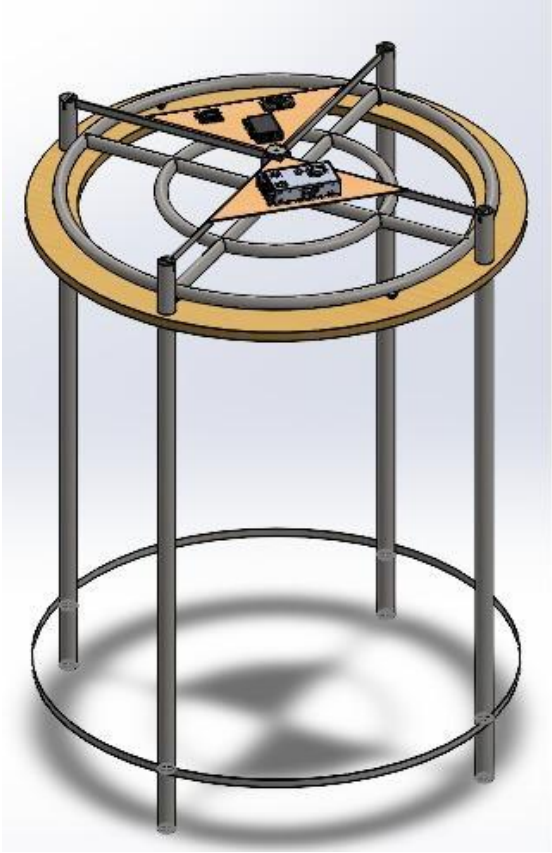


Figura 9. Ensamble final del guardarropa.

3.1 Simulaciones.

Para comprobar el funcionamiento y la capacidad del guardarropa diseñado se realizaron distintas simulaciones. Las consideraciones que se tomaron fueron las siguientes: el peso total de las prendas es de 64 kilos y la velocidad de rotación del mecanismo es de 1 rev/min.

Se realizó una prueba de cargas estática donde se obtuvo un factor de seguridad en la estructura es de 1.75, lo cual al ser mayor de 1 es un valor aceptable, ya que a las cargas de las prendas ya se les aplicó inicialmente un factor de seguridad de 2, lo que concluye que la estructura puede con el peso de las prendas de forma adecuada (figura 10).

De la misma manera se realizó una prueba de distorsión de Von Mises a la estructura. En la simulación se muestra que el esfuerzo máximo que puede soportar el prototipo será de 205 MPa, por lo que los resultados del diseño propuesto indican que podrá con las cargas planteadas de forma adecuada (figura 11).

La deformación máxima será de 6.49 mm, sin embargo, es en el punto central de la base giratoria, en el eje donde se une el motor a pasos con la estructura, por lo que la deformación en ese punto no afecta en el funcionamiento del mecanismo, ya que si esa distorsión fuera en un punto distinto si pudiera afectar el movimiento del guardarropa (figura 12).

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 18, pp. 223 – 234
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

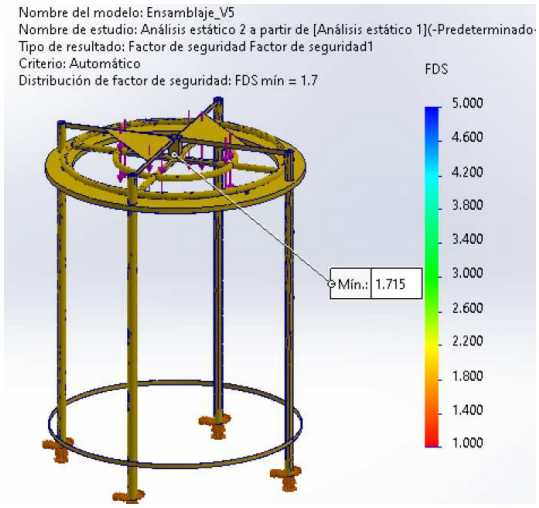


Figura 10. Factor de seguridad obtenido en la simulación.

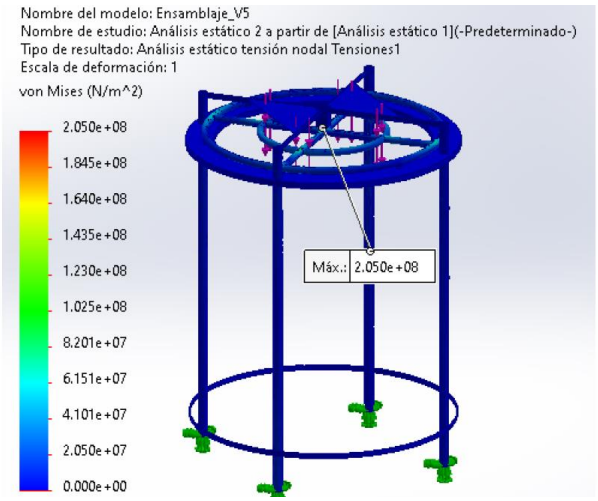


Figura 11. Resultado de la teoría de distorsión. Von Mises.

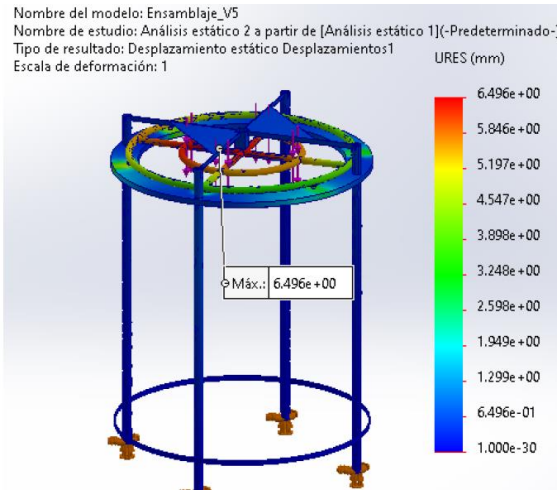
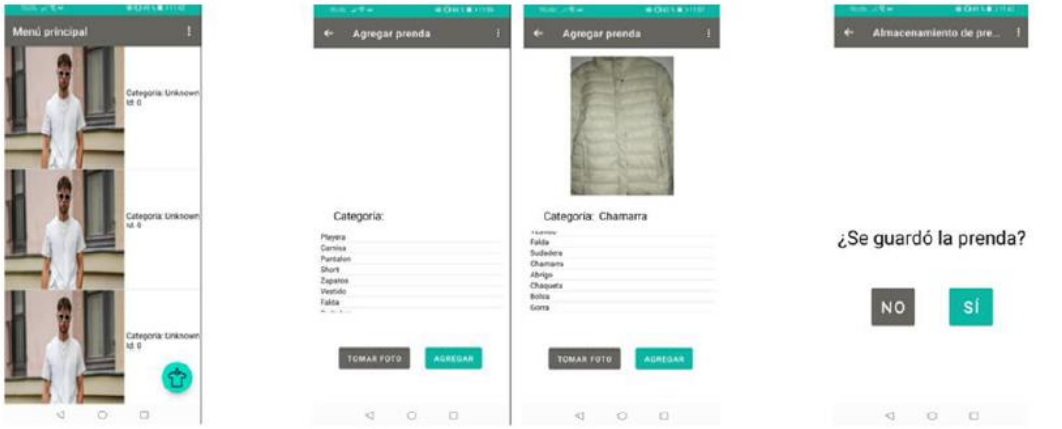


Figura 12. Deformaciones.

3.2 Aplicación Móvil

Una vez realizados los diagramas representativos de la funcionalidad general de la aplicación, se procede a realizar el diseño gráfico de la interfaz de la aplicación móvil [10] en la plataforma IntelliJ IDEA. En la figura 13a se aprecia de manera general cómo es que quedará el menú principal, aquí se mostrarán las 20 prendas con su respectiva categoría e identificador, además de un botón de eliminar para cada una de las prendas. La ropa se podrá ir visualizando conforme se vaya deslizando hacia arriba. Asimismo, en el menú de inicio existe un botón para agregar prendas, el cual abrirá la ventana para realizar este proceso.



a) *Menú principal* b) *Agregado de prenda* c) *confirmación de guardado*

Figura 13. Interfaz de aplicación móvil.

En la figura 13b se muestran dos botones, uno que permitirá tomar una foto a la prenda que se desea almacenar en el guardarropa y otro para agregarla a la base de datos. Al escanear la prenda se le asigna la categoría a la cual pertenece. Finalizado este proceso la aplicación se verá como se muestra en la figura 13c.

Para asegurar que realmente se guardó la vestimenta en el prototipo, se tendrá que realizar la confirmación de dicha acción, ya que se puede dar el caso en que el usuario se arrepienta de guardar dicha prenda. De la misma manera se desarrolló un procedimiento para realizar la confirmación de que una prenda seleccionada en realidad fue retirada del prototipo.

4. Conclusiones

Se logró diseñar de manera adecuada y sustentada el mecanismo correspondiente al guardarropa automático a pesar de que se presentaron problemas en la parte encargada de soportar el peso de las prendas, debido a que el aro donde se cuelgan presentaba una deformación considerable, además, la base fija no contaba con un apoyo que ayudará a distribuir las fuerzas en el aro, por lo que se optó por colocar una solera con pequeñas bases rectangulares soldadas a ésta, creando un apoyo en forma de “T”, logrando así que las deformaciones disminuyan considerablemente de 2cm a 4mm.

En la parte electrónica se presentan dos situaciones de gran importancia, en un inicio se pretendía que la tarjeta Raspberry fuera la encargada de manejar todo el sistema, sin embargo, al realizar un análisis detallado y realizar investigaciones sobre el funcionamiento del componente, se concluye que se presentarán problemas al momento de que el ordenador procese lo que se realiza en la aplicación y al mismo tiempo intente controlar el motor, por lo que se decidió complementar a la Raspberry con la tarjeta de desarrollo Arduino para el control del hardware.

La siguiente fase de este proyecto consiste en la fabricación del prototipo de acuerdo con el diseño aquí presentado, así como su validación a través de un uso residencial para obtener datos estadísticos que ayuden a mejorar el prototipo.

Referencias

[1] M. M. Roa, “Los países más poblados del mundo”, Statista, 10-jul-2020. [En línea]. Disponible en: https://es.statista.com/grafico/22249/porcentaje-estimado-de-la-poblacion-mundial-por-pais/. [Consultado: 27-abr-2023].

[2] R. Shishoo, The global textile and clothing industry: Technological advances and future challenges. Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2012.

[3] A. C. Espinal, C. E. Álvarez López, y R. A. Gómez Montoya, “Sistemas de identificación por radiofrecuencia, código de barras y su relación con la gestión de la cadena de suministro”, Estud. Gerenc., vol. 26, núm. 116, pp. 115–141, 2010.

[4] “Estanterías Industriales de Picking para Sector Textil: Prenda colgada o doblada”, Ar-racking.com, 04-nov-2020. [En línea]. Disponible en: https://www.ar-racking.com/es/actualidad/blog-soluciones-almacenaje/soluciones-de-almacenaje/estanterias-industriales-de-picking-para-sector-textil-prenda-colgada-o-doblada. [Consultado: 27-abr-2023].

[5] W. Stengg, The textile and clothing industry in the EU: A survey. Ciudad de Luxemburgo, Luxemburgo: Office for Official Publications of the European Communities, 2001.

[6] J. Castro, “How many clothes do I need? Results will Amaze You”, Lifestyle Fifty, 23-ene-2021. [En línea]. Disponible en: https://lifestylefifty.com/how-many-clothes-do-i-need-results-will-amaze-you/. [Consultado: 27-abr-2023].

[7] R. L. Norton, DISEÑO DE MAQUINARIA. McGraw-Hill Interamericana de España S.L, 2009.

[8] J. G. Enriquez y S. I. Casas, “Usabilidad en aplicaciones móviles”, Inf. Cient. - Téc. UNPA, vol. 5, núm. 2, pp. 25–47, 2014.

[9] F. Alarcón Barceló, “Desarrollo de Aplicaciones para la Plataforma Android : un caso de estudio para el intercambio de libros”, Repositorio Digital de la Universidad Politécnica de Cartagena, 2014.

[10] M. C. Albornoz, M. Berón, y G. A. Montejano, “Interfaz gráfica de usuario: el usuario como protagonista del diseño”, en XIX Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2017, ITBA, Buenos Aires), 2017.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 19, pp. 235 - 253
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Diseño de colmena automatizada con implementación de sistema de comunicación para monitoreo y control del proceso de recolección de miel

Hernández González Umanel Azazael[1], Cardona Candelas José Isaac[1], Matías García Daniel Mauricio[1], Ortiz Valdez Jorge Alberto[1], Villa Guerrero Juan Antonio[1], Delgado Pamanes Miguel Fernando[1], Mirelez Delgado Flabio Dario[1]

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

Resumen

El desarrollo del presente trabajo está enfocado en facilitar el proceso de recolección de miel, ya que, en México la mayoría de los apicultores desarrolla esta tarea de manera artesanal, incluso debe realizar visitas a las colmenas para verificar si ya están listas para ser cosechadas. Ante lo antes expuesto se propone el diseño de una colmena automatizada que pueda ser monitoreada a través de una aplicación móvil, que cuente con diferentes secciones como un alza superior donde estarán unos bastidores con movimiento interno para romper los opérculos y permitir que la miel se recolecte por efecto de la gravedad, un sistema de filtrado de miel y un sistema de almacenamiento de la misma. La colmena propuesta contará con fuentes de energía renovables para alimentar los circuitos electrónicos. Se proponen dos estrategias de control; un control On-Off para accionar el mecanismo de apertura y cierre de los bastidores y un control PI para regular la temperatura interna de la colmena. Todo el proceso será controlado por una tarjeta Arduino en conjunto con componentes comerciales de fácil adquisición.

Palabras clave: Apicultura, Automatización, Paneles artificiales, Recolección de miel, Aplicación remota

1. Introducción

La apicultura es una de las actividades más importantes a nivel mundial en los sectores sociales, económicos y ecológicos, siendo una de las principales ocupaciones pecuarias en México. En la parte ecológica, la apicultura cobra una importancia relevante, ya que las abejas se desempeñan como agentes polinizadores que contribuyen al mantenimiento y preservación de los ecosistemas y de la biodiversidad en general, así como de la producción de los cultivos donde participan [1]. A pesar de ser una actividad que se remonta a los inicios de la civilización humana, no se ha tenido gran avance tecnológico que permita facilitar el proceso de extracción de miel y al mismo tiempo ayude a preservar a las abejas.

Una colmena es el habitáculo de las abejas y el enjambre o colonia que vive en ella. Estas colonias pueden ser de hasta 80,000 individuos, separados en tres castas: las obreras, los zánganos y la abeja reina [2]. De acuerdo con [3] las partes de una colmena son:

- **Base**. Es una caja la cual funciona como soporte ayudando como defensa de la colmena, denegando la entrada a la colmena a seres exteriores a ésta.

- **Piquera o cámara de cría**. Caja con una abertura por la cual pueden entrar las abejas hacia la parte donde se encuentra la reina.

- **Alza**. Alza es el cajón donde van colgados diez (a veces solo ocho) cuadros y que sirve para miel (si está arriba) o para cámara de cría (cuando están abajo) según su ubicación. Algunos productores prefieren alzas de menos altura (tamaño medio) para miel por su alto peso cuando están llenos y un cuerpo estándar para la cámara de cría. Afuera hay agarraderas para elevar.

- **Bastidor**. Soportes de cada panal que se encuentran dentro del alza, en los cuales las abejas almacenan la miel dentro de los hexágonos que estos forman. También pueden ser usados en la cámara de cría para almacenar a las larvas y a la reina.

- **Techo**. Cubierta superior de la colmena.

El proceso tradicional de obtención de miel requiere de experiencia en apicultura, ya que conlleva el uso de herramientas y técnicas tales que al emplearse no dañen la estructura de la colmena. Todo se hace sobre el banco para desopercular o alza, donde se elimina primeramente el opérculo que es una capa de cera que protege a la miel y que es creada por las abejas obreras.

Después de eliminar el opérculo se necesitará quitar la capa superficial de la miel y posteriormente verificar que ninguna celda quede tapada con el opérculo restante, en caso contrario, se debe usar un peine para destapar todas esas celdas faltantes. Una vez verificados los pasos anteriores, se extrae la miel en una mesa de extracción con herramientas como cuchillos y rodillos. Por último, la miel es filtrada por medio de mallas metálicas para eliminar cualquier contaminante [4].

El desarrollo de este trabajo, además de automatizar el proceso de recolección de miel, también busca la disminución de la muerte de abejas al considerar un sistema de calefacción en el interior de la colmena y que el apicultor solo la abra cuando sea el momento de recolectar la miel en lugar de hacer revisiones periódicas. Respecto a la mortandad de las abejas, según [5], del 1 de octubre 2016 al 1 de octubre 2017 se perdieron 56.1% de colmenas de abejas melíferas en Chile y un 12.6% en Ecuador y Perú. Por otro lado, Brasil perdió el 41% de colmenas de abejas nativas sin aguijón. La encuesta analizó una muestra de 138,784 colmenas de abejas melíferas y 2,199 de abejas nativas sin aguijón de diversos países entre los que destacan México, Argentina, Uruguay y Brasil.

2. Estado del arte

El 18 de diciembre del año 2014 Cedar Anderson y Stuart Anderson crearon una colmena con tecnología “Flow” [6], en donde con una llave que se inserta en una caja se puede extraer la miel ya que al girarla se extrae la miel sin necesidad de sacar los bastidores de las alzas. Tal como se muestra en la figura 1 se acciona un mecanismo que parte los paneles en dirección vertical, provocando que la miel fluya hacia abajo, con la ayuda de la gravedad. La miel sigue su curso hasta un tubo exterior y está lista para ser consumida sin la necesidad de algún filtro. Este sistema cumple con el objetivo de reducir las molestias a las abejas e incrementar la producción melífera.

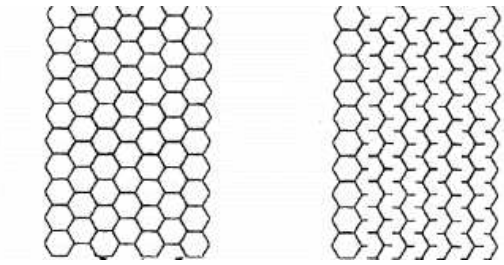


Figura 1. Funcionamiento de paneles, celdas cerradas para almacenar miel (izquierda) y celdas abiertas para que la miel fluya por efecto de la gravedad (derecha).

Otros trabajos se han enfocado en el monitoreo de las colmenas, por ejemplo, en [7], se usa un microcontrolador ATMEGA2560 para medir la temperatura, la humedad relativa, el peso, la presión atmosférica y la intensidad del sonido en el interior de la colmena, posteriormente esos datos se envían por Wi-Fi a una página web done pueden ser consultados. Así mismo en [8] se presenta un dispositivo que toma muestras en 14 canales: seis para medir la temperatura y ocho para el audio, siendo este último de hasta 1 kHz. Calcula la transformada rápida de Fourier y guarda su módulo para representar la energía en cada banda de frecuencia. Toda la información se almacena localmente en una tarjeta de memoria flash y posteriormente se envía a un servidor remoto mediante GPRS.

En [9] también se presenta un sistema de monitoreo dentro de la colmena usando sensores de temperatura, masa, sonido, humedad relativa, nivel de gas (feromona), presión atmosférica e imágenes de vídeo, con el objetivo de promover que las abejas se desarrollen en un ambiente confortable. De manera similar en [10] se propone un sistema que adquiere la temperatura, la humedad y el peso de la colmena y envía estos datos a la aplicación móvil a través de una red inalámbrica. El sistema también realiza un análisis de los ruidos de las abejas recogidos con una red neuronal artificial e informa al apicultor para evitar enjambres no deseados. Por otro lado, en [11] se presenta un sistema que además de monitorear el estado de la colmena, cuenta con actuadores, en este caso usados para eliminar a los avispones asesinos.

Como puede apreciarse, los trabajos de desarrollo e investigación se enfocan en el monitoreo del estado de la colmena, sin embargo, el proceso de producción de miel es más extenso e involucra al ser humano, de manera que la propuesta de este artículo también incluye la tecnificación de los procesos de recolección de miel que siguen siendo rudimentarios y extenuantes.

3. Metodología

Para el desarrollo de este proyecto se optó por implementar la metodología de diseño mecatrónico, ya que es la metodología más indicada para alcanzar los objetivos establecidos. El sistema de monitoreo para el fomento de la producción apícola automática consiste en una herramienta, la cual combina sistemas electrónicos, electromecánicos y ofimáticos para el control de la producción de miel de abeja, informando al usuario acerca del estado interno de la colmena [12]. En la figura 2 se muestran las áreas del proceso del proyecto propuesto.

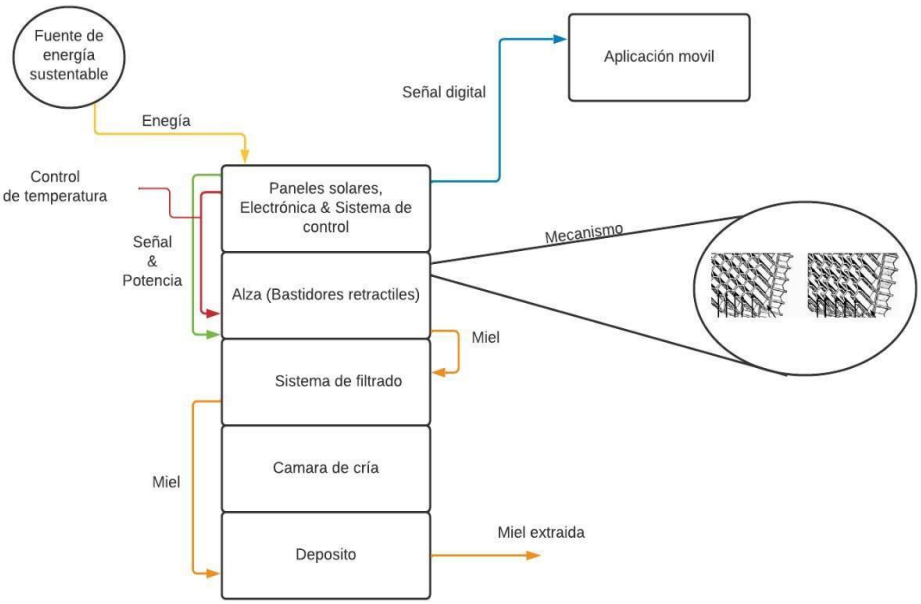


Figura 2. Metodología de diseño.

3.1 Identificación de necesidad

La manera en que se realiza el proceso de apicultura es un método tradicional que se ha mantenido por varias décadas sin cambios significativos. Con los avances en la tecnología se tienen varias alternativas para la supresión de los problemas comunes que se presentan a la hora de la recolección de miel, esto incentivó a buscar una manera óptima de incrementar la eficiencia del trabajo realizado, otra cosa que se pudo identificar es que el área de la mecatrónica está poco incluida en la apicultura con lo cual se puede hacer algo para que la tecnología ayude a amplificar las ganancias de esta actividad.

3.2 Análisis del problema

Actualmente la cosecha de miel puede ser en ocasiones poco eficiente y laboriosa, pues sigue siendo una actividad manual. Al trabajar con abejas se pueden observar distintos problemas donde el más importante es el tiempo, lo que más tiempo implica es hacer que las abejas construyan las celdas del panal. Por otro lado, la revisión constante de cada una de las colmenas, así como cada vez que se retira la miel, provoca la muerte y alteración de las abejas; lo cansado que es recolectar cada una de las alzas donde está la miel sin mencionar que cada bastidor se tiene que cepillar para quitar las abejas de encima, la cantidad de herramientas y procesos por los que tiene que pasar la miel para poder extraerla de los bastidores son bastantes. Estas situaciones mencionadas se pueden solucionar con un dispositivo que incorpore cada uno de los puntos antes mencionados en un solo prototipo, haciendo el proceso más sencillo y rápido que el tradicional.

Para hacer un mejor análisis del proceso se hará una descomposición en cada uno de los problemas ya descritos, además de incorporar los nuevos que vayan surgiendo durante el proceso de desarrollo, con la finalidad de solucionar cada uno de ellos y poderlos integrar en un solo prototipo. Haciendo uso de diagramas IDEF-0 los cuales se utilizarán para encontrar la forma de atacar los dilemas.

Para el planteamiento de los diagramas IDEF-0 de la colmena automatizada, se tiene como entrada el néctar natural recolectado por las abejas. Como controles para que el proceso se lleve a cabo se tendrá la conexión con el usuario, puesto que, al ser una planta que estará aislada y a la intemperie, se requiere de una comunicación inalámbrica para que esté en conexión con el usuario para medir sus diferentes parámetros. Además, otro control es la adaptación de las abejas, ya que, si éstas no se adaptan de una manera correcta, o el ambiente no es habitable, abandonarán la colmena. Por último, la temperatura interna como control, ésta controla la planta ya que si no existe una temperatura adecuada no habrá viabilidad como se indicó en la parte de justificación.

Como mecanismos se tienen los contenedores de grado alimenticio para almacenar la miel, la instrumentación con la cual se hará el proceso de automatización, los actuadores que harán posible esta última, la colmena de madera, el mecanismo interno para mover los bastidores y el sistema de filtrado para la miel. Todo esto tendrá como salida la miel recolectada por la planta. Lo descrito anteriormente se puede visualizar en el diagrama de la figura 3.

Definiendo detalladamente el proceso de recolectado de miel, y sabiendo los controles, entradas y mecanismos, se puede separar el proceso en varios subprocesos como se puede apreciar en la figura 4, los cuales son: la recolección del néctar por medio de los bastidores, apertura de las celdas, filtrar la miel y llenar los depósitos

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 19, pp. 235 - 253
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

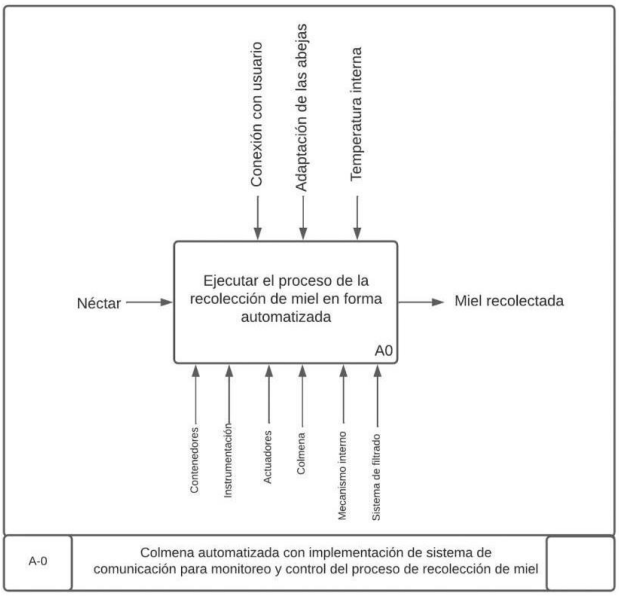


Figura 3. Diagrama A-0.

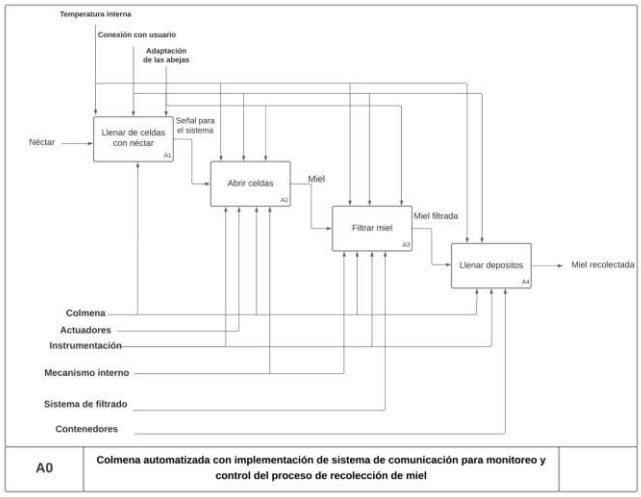


Figura 4. Diagrama A0.

3.3 Especificaciones de diseño

Para conseguir un diseño que cumpla con los objetivos establecidos, se requiere enumerar cada una de las diferentes necesidades y problemáticas que se han encontrado a lo largo de la investigación, y con ayuda de la tabla 1 se le asigna un valor numérico de su importancia dentro del sistema.

En la tabla 1 se enlistan las necesidades que debe llevar el proyecto, ponderado del 1 al 5, donde 5 es lo menos importante y 1 lo más importante.

En la tabla 2 se muestran las relaciones que existen entre las necesidades con respecto a la lista de métricas.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 19, pp. 235 - 253
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Tabla 1. Tabla de necesidades.

No.	Necesidad	Importancia relativa
1	Calidad de la miel	1
2	Mecanismos sin perturbaciones por vibración	3
3	Temperatura adecuada	3
4	Aplicación móvil intuitiva	4
5	Adaptación de las abejas	1
6	Resistencia suficiente de la colmena	2
7	Potencia suficiente del mecanismo	2
8	Filtrado correcto de la miel	3
9	Medidas de sanidad en contenedores	2
10	Cierre hermético	3
11	Alimentación suficiente de energía	2
12	Comunicación inalámbrica	2
13	Sistema manual	2

Tabla 2. Matriz de necesidades y métricas.

Necesidad / Métrica		1 Calidad de la miel	2 Vibraciones del mecanismo	3 Tiempo de respuesta	4 Potencia del mecanismo	5 Temperatura	6 Resistencia de estructura	7 Capacidad eléctrica	8 Voltaje requerido
1	Calidad de la miel.	■							
2	Mecanismos sin perturbaciones por vibración.		■						
3	Temperatura adecuada.					■			
4	Aplicación móvil intuitiva.			■					
5	Adaptación de las abejas.								
6	Resistencia suficiente de la colmena.						■		
7	Potencia suficiente del mecanismo.			■	■				
8	Filtrado correcto de la miel.	■							
9	Medidas de sanidad en contenedores.	■							
10	Cierre hermético.	■							
11	Alimentación suficiente de energía.							■	■
12	Comunicación inalámbrica.			■					
13	Sistema manual				■				

Las funcionalidades generales requeridas para el desarrollo del proyecto son las que se nombran a continuación:

- El actuador utilizado será seleccionado para tener la fuerza de desplazamiento suficiente para abrir las celdas de miel.

- Los mecanismos utilizados deberán ser silenciosos para no perturbar a la colmena de abejas y estas puedan realizar su trabajo adecuadamente.

- Las celdas de almacenamiento de miel tendrán la resistencia mecánica necesaria para soportar el desplazamiento dejando fluir la miel a los contenedores (estructura interna).

- El diseño de la estructura externa deberá contar con la suficiente resistencia mecánica para soportar la colmena de abejas, el mecanismo de apertura, sistema de temperatura y alimentación.

- Para la comunicación móvil se deberá contar con un módulo de rango suficiente para mantener al usuario informado, un diseño agradable, permitir el intercambio de información y uso de datos.

- Para la alimentación del sistema, se deberá suministrar la energía suficiente para el funcionamiento de los módulos de comunicación, microcontrolador, sensores y para accionar el mecanismo.

- El control de temperatura mantendrá la colmena de 32 a 36°C, para no afectar a las abejas y proveer de las condiciones adecuadas para que la miel se mantenga en estado líquido y facilitar su flujo.
- El sistema de llenado contará con los filtros necesarios para evitar impurezas en los contenedores.

- El contenedor deberá ser de grado alimenticio y contar con cierre hermético para evitar la contaminación de la miel.

- El prototipo desarrollado cumplirá con las regulaciones y medidas estándar del sector apícola o generales que se apliquen

Para poder generar posibles soluciones se empleó el método de lluvia de ideas, mostradas en la tabla 3.

Tabla 3. Caja morfológica.

Fuente de alimentación.	Batería recargable	Celdas solares	Generadores eólicos	
Material de los bastidores	Acrílico	Polímero	Aluminio	
Sistema encargado de abrir y cerrar las celdas	Levas	Cilindro hidráulico o neumático	Motor eléctrico	Tornillo sin fin y palancas.
Elementos del control de temperatura	PID	Neurodifuso		
Elementos del sistema de filtrado	Malla plástica	Malla de acero inoxidable	Motor eléctrico para limpiado	
Material del depósito	Plástico de grado alimenticio	Acero inoxidable de grado alimenticio		
Software de la aplicación	Arduino Studio	Native Script	App Inventor	
Material de la estructura externa	Madera	Plástico		
Sensor	Fuerza	Infrarrojo	Ultrasónico	Temperatura

Como primer acercamiento real al diseño, se tiene un gráfico general como se muestra en la figura 5 de lo que sería el prototipo, para un análisis más detallado se secciona en partes y así ver lo que se busca obtener con cada una de ellas y el cómo se conjuntan para el cumplimiento de los objetivos.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 19, pp. 235 - 253
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

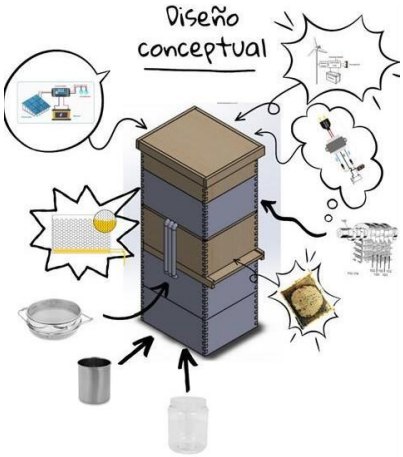


Figura 5. Diseño conceptual.

En este diseño para la fuente de alimentación se usan generadores eólicos, colocados en la parte superior del prototipo. Para el sistema encargado de abrir y cerrar las celdas se utilizarán pistones hidráulicos, mientras el sistema de filtrado se encuentra por debajo del alza superior por medio de una malla plástica. Por otro lado, el depósito de almacenaje se encontrará en la parte inferior de la estructura y será de plástico de grado alimenticio. Los bastidores serán de aluminio (figura 6).

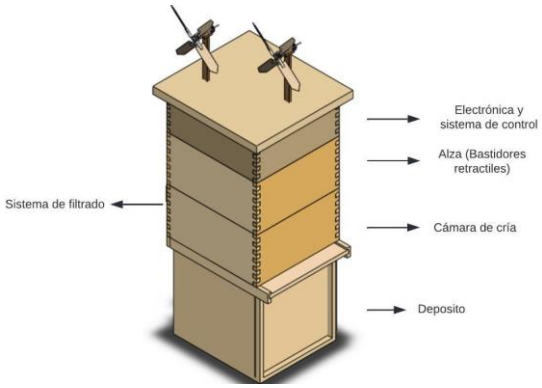


Figura 6. Diseño conceptual 1.

Para este diseño, se optó por utilizar como fuente de alimentación una batería recargable colocada dentro de la caja de electrónica, además de usar como mecanismo un tornillo sin fin para mover las celdas y romper el opérculo, los bastidores serán de acrílico, el depósito será de acero inoxidable y el sistema de filtrado consistirá en un motor eléctrico con cepillo para su limpiado (figura 7).

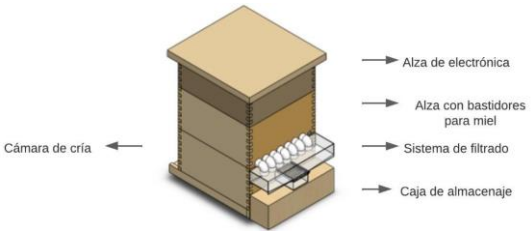


Figura 7. Diseño conceptual 2.

Para el diseño 3 en la fuente de alimentación de energía se tienen paneles solares que irán conectados a una batería, la cual se encargará de recolectar y distribuir la energía necesaria a los

diferentes sistemas, para el mecanismo encargado de abrir y cerrar las celdas de cada bastidor se usará un mecanismo de tijera y un motor DC conectados a cada bastidor por medio de una placa, los bastidores serán de polímero de grado alimenticio, el sistema de filtrado se encontrará debajo de los bastidores para después que fluya la miel, quitarle las impurezas que vayan con ella, posteriormente las tuberías conectadas a este transportarán la miel a la zona de almacenaje la cual estará compuesta por un bote plástico de grado alimenticio con la capacidad de cerrarse y evitar la contaminación de la materia. Este bote estará resguardado por una caja de madera sobre la cual estará cimentada la colmena (figura 8).

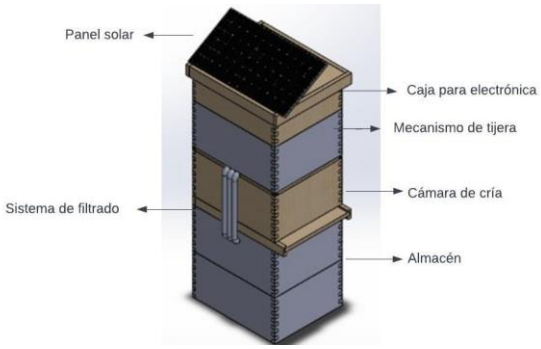


Figura 7. Diseño conceptual 3.

En la tabla 4 se pueden apreciar los puntos a considerar para el diseño y construcción de la colmena automatizada, los criterios de selección son propuestos por los autores de acuerdo con las necesidades planteadas en la tabla 1.

Tras presentar los 3 diseños conceptuales, se procede a la elección del diseño conceptual más adecuado con base en una valoración de los aspectos mencionados, considerando la pertenencia para cada criterio acorde con la tabla 4 y ponderándola con un valor asignado según el criterio de los autores y de acuerdo con su experiencia en el desarrollo de proyectos mecatrónicos. La ponderación propuesta para cada criterio de selección según el diseño conceptual a evaluar es: malo = 0.25, regular = 0.5, bueno = 0.75, excelente = 1, como se puede apreciar en la tabla 5.

Tabla 4. Tabla de pertenencia.

Criterio de selección	A	B	C	D	E	F	G	H	Total	Pertenencia
A. Autonomía		0.5	0.5	1	1	1	1	1	6	0.2143
B. Costo de fabricación	0.5		0.5	1	0.5	1	1	1	5.5	0.1964
C. Adaptación de la colmena	0.5	0.5		1	0.5	1	1	1	5.5	0.1964
D. Tamaño	0	0	0		0	0.5	0	0.5	1	0.0357
E. Procesos de manufactura	0	0.5	0.5	1		1	1	1	5	0.1786
F. Proceso de instalación	0	0	0	0.5	0		0.5	0.5	1.5	0.0536
G. Aplicación intuitiva	0	0	0	1	0	0.5		0.5	2	0.0714
Comunicación con el usuario	0	0	0	0.5	0	0.5	0.5		1.5	0.0536
								Total	28	1

Tabla 5. Tabla de selección.

Objetivos	DC1	DC2	DC3	Pertenencia
Autonomía	0.75	0.5	1	0.2143
	0.1607	0.1071	0.2143	
Costo de fabricación	0.75	0.5	0.75	0.1964
	0.1473	0.0982	0.1473	
Adaptación de la colmena	0.75	0.5	1	0.1964
	0.1473	0.0982	0.1964	
Tamaño	0.75	0.75	0.75	0.0357
	0.0268	0.0268	0.0268	
Procesos de manufactura	0.75	0.5	0.75	0.1786
	0.1339	0.0893	0.1339	
Procesos de instalación	0.75	0.5	1	0.0536
	0.0402	0.0268	0.0536	
Aplicación intuitiva	0.75	0.75	0.75	0.0714
	0.0536	0.0536	0.0536	
Comunicación con el usuario	0.75	0.75	0.75	0.0536
	0.0402	0.0402	0.0402	
Total	0.75	0.542	0.8661	

De acuerdo con la tabla 5, se observa que el diseño conceptual 3 es la selección más viable en relación con cada uno de los objetivos planteados.

4. Diseño detallado

Se decidió utilizar la madera de pino (recubierta de parafina como tratamiento protector, para el exterior e interior de la colmena), como material para la elaboración del alza, cámara de cría y cámara para la electrónica. Al ser una madera blanda no es complicado clavar tornillos o clavos y resulta fácil trabajarla en máquinas de corte. Además, gracias a su cubierta de cera, podrá ser hidrofóbica, lo que la hace duradera en condiciones de humedad y para lluvia. En las figuras 9a, 9b y 9c se muestra el diseño de los diferentes apartados y estructuras y en la figura 10 se muestra la estructura del diseño conceptual seleccionado.

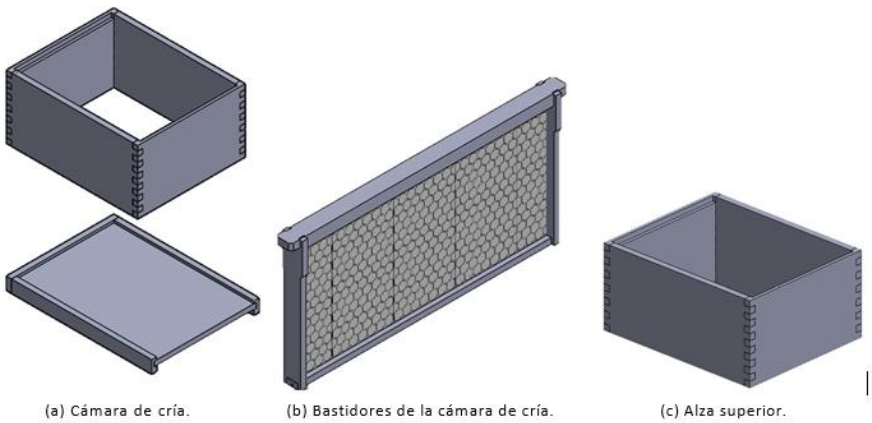
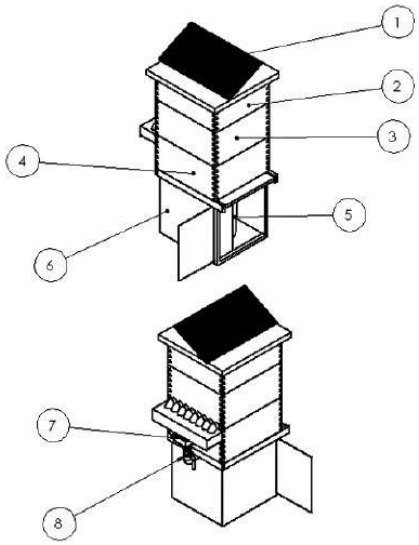


Figura 9. Estructuras de la colmena.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 19, pp. 235 - 253
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023



1. Panel solar.
2. Alza de componentes electrónicos.
3. Alza para el mecanismo de bastidores retractiles.
4. Cámara de cría.
5. Contenedor de almacenaje.
6. Caja de almacenaje.
7. Sistema de filtrado con malla y motor lineal.
8. Electroválvula para sistema de almacenaje.

Figura 10. Componentes de diseño detallado.

4.1 Diseño mecánico

Se pensó en un mecanismo de tijera que desplazará los bastidores móviles hacia arriba, mientras la otra parte se quedará fija para abrir los hexágonos tal como se muestra en la figura 11, derivando así en un diseño para los bastidores compuestos de una parte fija y una retráctil (figura 12), esta última subirá mediante el mecanismo propuesto, para romper el opérculo de la celda y dejar fluir la miel hasta los tubos ubicados en la parte inferior.

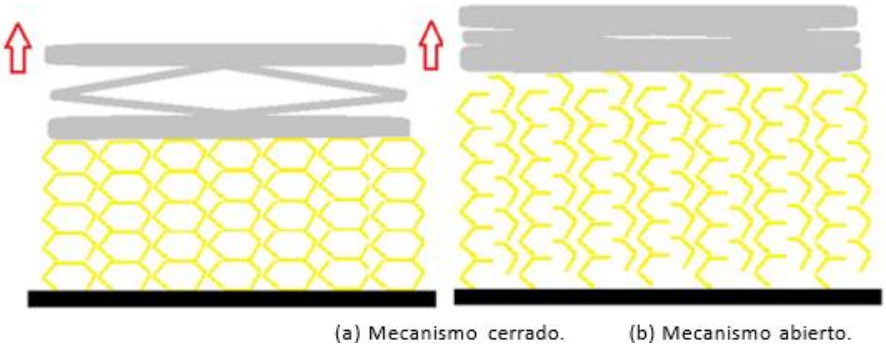


Figura 11. Funcionamiento del mecanismo.

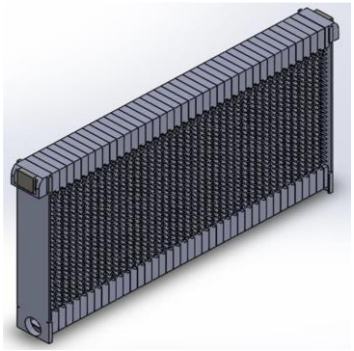


Figura 12. Bastidor retráctil.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 19, pp. 235 - 253
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Las partes móviles irán conectadas por una pieza fabricada a partir de una solera de 1/8 x 1 1/4 in. En la figura 13 se observa el mecanismo del bastidor en vista explosionada, mostrando las partes fijas y móviles, además de la placa que desplazará verticalmente estas últimas.

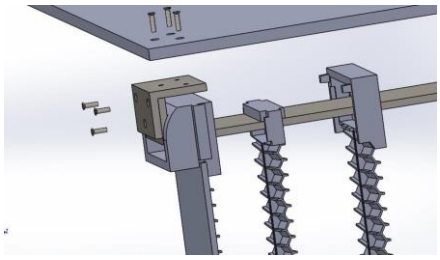


Figura 13. Vista explosionada, componentes del bastidor retráctil.

Para el cálculo de fuerzas se realizó un análisis en la fuerza ejercida al bastidor y las celdas que lo conforman, para ello se utilizó la hoja de datos del gato eléctrico (mecanismo de tijera seleccionado), para conocer la fuerza máxima que pueden ejercer y con base en ésta realizar los cálculos. La Fuerza máxima del gato eléctrico es de 2000 Kg, por lo que la fuerza máxima a cada bastidor (es decir, se tienen 8 bastidores y en cada uno de ellos 39 hileras móviles) es igual a 2000/8*39= 6.4 Kg.

Por lo tanto, se puede decir que la fuerza máxima aplicada a cada hilera de celdas que se va a levantar será de 60 N, lo cual es una fuerza superior a la necesitada para despegar la cera y miel en cada hilera de celdas, al ser una medida ambigua no se puede especificar qué tan fuerte serán las uniones, pues depende de varias condiciones como la calidad de la miel, tiempo de almacenamiento, pureza e incluso del tipo de flor de la que se recolecta el néctar.

La simulación del mecanismo, mostrada en la figura 14, se realizó mediante un software de análisis de mecanismos, donde se colocaron los eslabones con sus dimensiones y la fuerza que aplicará el motor del mecanismo, obteniendo así su desplazamiento, velocidad y aceleración

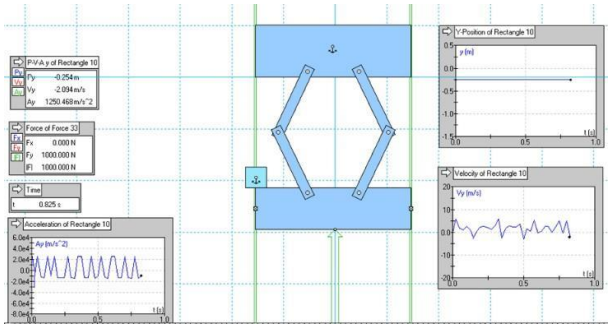


Figura 14. Simulación de movimiento de mecanismo.

El resultado de la simulación mostrado en la figura 15 indica que el sistema tiene el movimiento y desplazamiento esperados para que las celdas de los bastidores se abran correctamente.

- Desplazamiento: 6 mm.
- Velocidad: 1.475 m/s.
- Aceleración: 3.039 × 104 m/s^2.

Para la simulación de la fuerza previamente calculada se utilizó SolidWorks®, y así verificar que la solera seleccionada soporte la máxima fuerza supuesta de 60 N, ya que no se llegará a tal punto (figura 16).

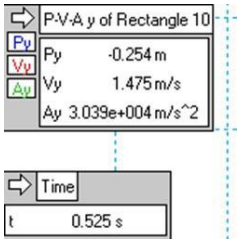


Figura 15. Resultados de simulación.

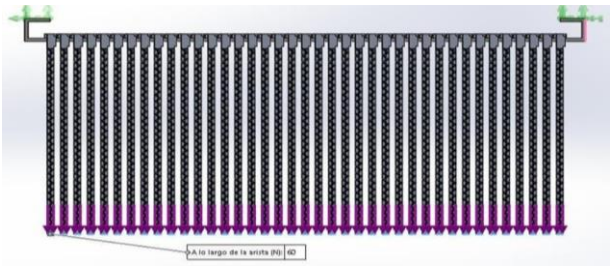


Figura 16. Simulación carga a bastidores.

Como se puede observar en la figura 17 el desplazamiento máximo es de 1 mm el cual no influye en el movimiento de las celdas, pues el movimiento total es de 6 mm. Con los 5 mm restantes se crea el espacio suficiente para permitir el flujo de miel, lo que indica que funcionará adecuadamente.

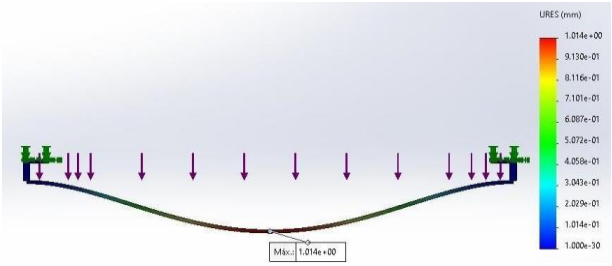


Figura 17. Desplazamiento de solera.

El diseño del sistema de filtrado consta de un filtro manualmente intercambiable y limpieza automática. Para cumplir con esto, se diseñó por medio de SolidWorks una caja de acrílico, a la cual le llegará la miel cuando se abra el mecanismo de los bastidores, dejándola caer a una rampa con ángulo de 3.6°, donde se filtrará por medio de una malla de acero inoxidable (figura 18), eliminando todos los residuos o elementos ajenos a la miel.

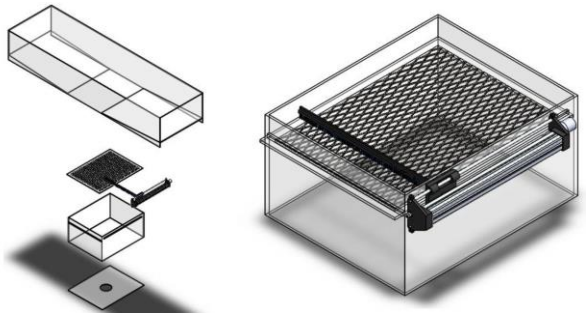


Figura 18. Sistema de filtrado.

La caja para el sistema de filtrado mostrada en la figura 18, se fabricará con acrílico polarizado o de color ámbar para contrarrestar la luz incidente a la miel que recorre la caja. También se visualiza de una manera detallada la caja del proceso de filtración, con la malla en la parte superior y un motor lineal en la cara derecha de la caja. Para la parte de la limpieza se eligió un motor a pasos tipo lineal con una corredera horizontal, permitiéndole un movimiento libre en un eje, de derecha a izquierda. A éste se le implementará una escobilla de creación propia mostrada en la figura 19 con el propósito de arrastrar la miel que no alcance a llegar a la rejilla. Es importante mencionar que no quedarán restos de miel pegada en la escobilla o en el sistema de filtrado ya que las mismas abejas se encargan de volver a recolectarla y llevarla a los bastidores.

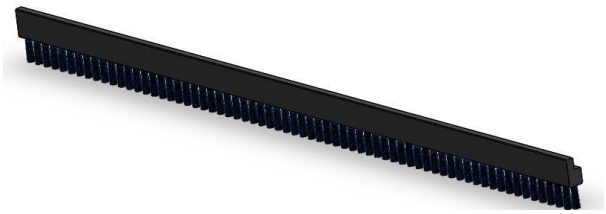


Figura 19. Escobilla para filtrado.

Para el almacenamiento se seleccionó un contenedor de cubo para miel hecho de plástico natural de uso alimenticio para miel, fabricado de polipropileno de alta densidad, cuenta con una capacidad de 19 litros o 27 kilos de miel. El diseño del sistema del almacenamiento consta de una electroválvula modelo 176-2064 de la marca RS-PRO, ésta estará conectada al tubo por donde fluye la miel de los bastidores al contenedor y se cerrará una vez el mecanismo cierre los bastidores para evitar estancamientos cuando la miel deje de fluir (ver la figura 20).

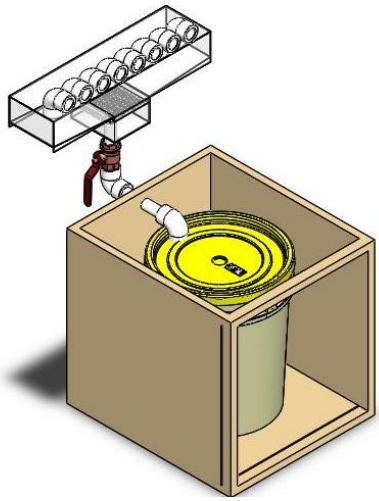


Figura 20. Método de flujo de miel.

El contenedor y el tubo de flujo de miel se colocarán en la parte inferior de la colmena, tendrá una puerta deslizante que se abrirá manualmente cada vez que se requiera recoger el bote de miel. En la tapa superior del bote de almacenamiento se tendrá un orificio (figura 21), en donde se colocará el sensor ultrasónico que mediará el porcentaje de llenado del contenedor y con base en éste, se enviará una señal a la interfaz.

Se seleccionó el sensor ultrasónico HC-SR04, trabaja independiente al color, transparencia, brillo o acabado, tiene resistencia a ambientes húmedos, con polvo o niebla, puede detectar a objetos a gran distancia, es económico y sencillo de conseguir con respecto a los demás sensores de nivel en el mercado.

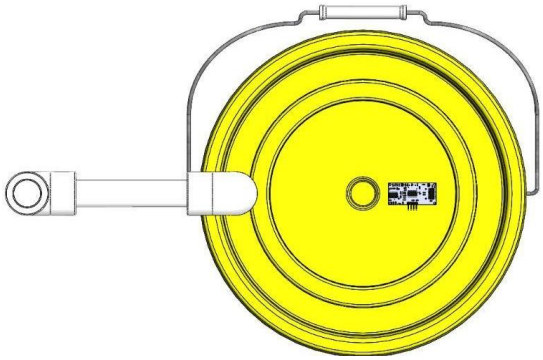


Figura 21. Tapa superior de bote de almacenaje.

Para el diseño del sistema de control del cierre y apertura de los bastidores se optó por un lazo cerrado y se contemplaron 4 puntos importantes; el controlador, el actuador, el proceso (apertura y cierre del mecanismo para el vaciado de la miel a través de los bastidores) y la retroalimentación que vendrá del sensor de presencia. El controlador seleccionado será un Arduino UNO R3 ya que cuenta con los puertos necesarios para conectar los componentes a utilizar (14 pines digitales y 6 pines analógicos), la capacidad de procesamiento es suficiente para las funciones requeridas, tiene bajo consumo energético y es de un precio accesible.

Para el proceso del sistema se abrirán o cerrarán las celdas según el valor de la señal del controlador, la acción se realizará mediante un mecanismo de tijera eléctrico como el mostrado en la figura 22 que se contrae una vez finalizado el tiempo de vaciado de miel y se expandirá cuando una señal del Arduino lo indique. Se seleccionó este actuador porque es una de las herramientas más precisas para elevar objetos y accesorios pesados además de resistir grandes cargas.

Figura 22. Gato eléctrico tipo tijera.

Para la señal de retroalimentación del sistema se seleccionó un interruptor que actuará como sensor (final de carrera) para determinar el estado del mecanismo, el interruptor se presiona una vez el mecanismo de tijera se contrae indicando que el mecanismo llegó a su posición deseada, cuando se expande el actuador, el switch se libera e indica que el estado del sistema está apagado.

De acuerdo con [13], un controlador On/Off tiene una salida de dos posiciones, solo tiene dos estados como un interruptor cambiando entre dos valores. Por lo tanto, se seleccionó este tipo de controlador al ser sencillo de programar y cumplir con la función requerida para el sistema, ya que ésta cuenta solo con dos estados, uno encendido y otro apagado. Se agregará un temporizador y el botón previamente especificado para alternar el estado del sistema, ya sea que lo apague o lo encienda según el tiempo requerido.

El sistema de control preliminar se mantendrá como el ejemplificado en el sistema de lazo cerrado, con un controlador On/Off, una vez que se cuenten con los componentes necesarios se

procederá implementar este control en una placa Arduino para realizar las pruebas correspondientes (figura 23).

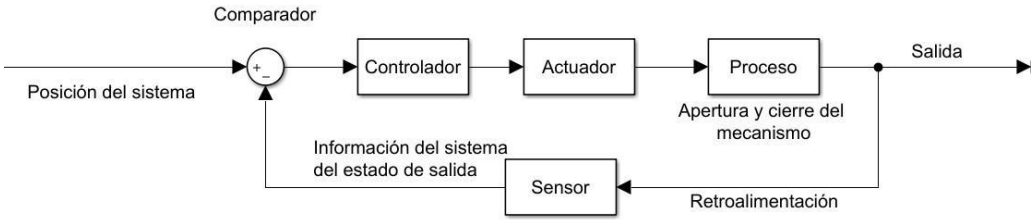


Figura 23. Diagrama de lazo cerrado On/Off para la abertura de los bastidores.

Para simplificar el modelado del sistema de control de temperatura del proceso, se analizó en términos de capacitancia y resistencia térmica. De esta forma el sistema calienta una lámina de acero galvanizado calibre 28 con dimensiones de 10 x 10 in, tiene una conductividad térmica de 52.5 W/m·K y es más barata en comparación con otro tipo de materiales como el aluminio o el cobre. La lámina estará dentro del alza superior como se observa en la figura 24.

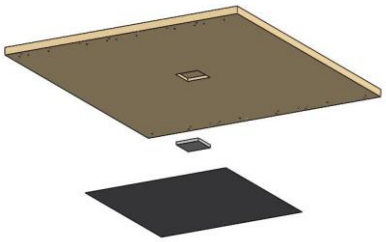


Figura 24. Ubicación del actuador térmico (cuadro pequeño) y la lámina (cuadro gris oscuro).

La temperatura ideal para una colmena oscila entre los 32 y 36°C, para esto se seleccionó un sensor de temperatura BMP180 ya que funciona en este rango y tiene un error bajo. Como actuador térmico se optó por el Tec1-12705 puesto que alcanza a disipar hasta 61°C, por ende, cumple con la temperatura necesaria para la colmena. Además, el actuador (que es una celda peltier) genera calor por un lado y por el otro enfría, la parte que genera calor se conectará a la lámina previamente mencionada mientras que con la placa de madera que sostiene los bastidores estará aislando la parte que genera frío (figura 24).

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores y suponiendo una capacitancia térmica de la lámina como CL y la resistencia térmica de la misma como RL, el sistema se comporta de la siguiente forma:

$$Q_T - Q_L = C_L \frac{dT_l}{dt} \tag{1}$$

donde:
QT: Calor emitido por el actuador.
QL: Calor disipado por la lámina.
$\frac{dT_l}{dt}$ Razón de cambio de temperatura con respecto al tiempo.

La ecuación diferencial se transformó al dominio de Laplace y posteriormente se representó en un sistema de control en lazo cerrado usando un diagrama de bloques como se puede apreciar en la figura 25.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 19, pp. 235 - 253
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

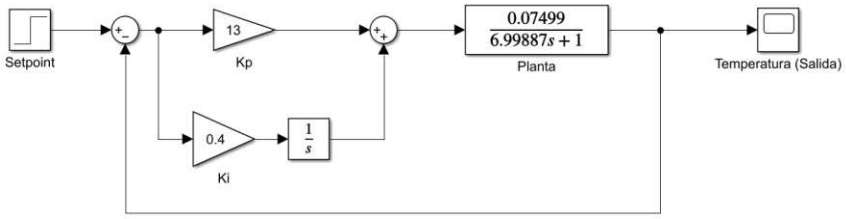


Figura 25. Controlador de temperatura.

Se procedió a sintonizar el controlador usando el criterio de Routh-Hurtwitz y se simuló el diagrama a bloques en un software de cálculo numérico. En la respuesta del sistema se observa que tarda aproximadamente 200 segundos en llegar a una temperatura deseada de 32°C, como se muestra en la figura 26, lo cual es un tiempo adecuado por que el sistema no comenzará en 0 grados, y de igual manera no requiere un cambio rápido de temperatura, ya que esto podría perturbar a los organismos vivos dentro de la colmena.

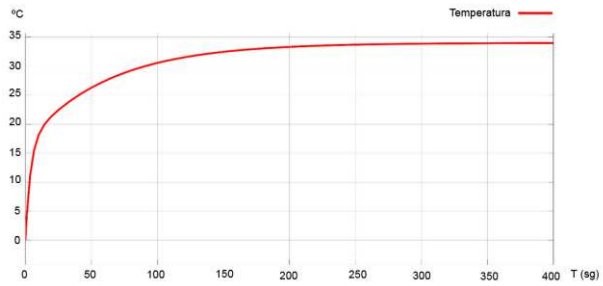


Figura 26. Respuesta de temperatura con respecto al tiempo.

Por otro lado, se utilizó un software de diseño electrónico para la creación de los diagramas eléctricos de conexiones, considerando una fuente de alimentación con panel solar (figura 27, A) y un controlador de voltaje para entregar la energía suficiente a la batería (figura 27, B) y a los componentes electrónicos sin dañarlos, En la figura 27 se puede apreciar cómo se conectaría el Arduino a los actuadores (figura 27, C), sensores (figura 27, D) y el módulo de comunicación (figura 27, E).

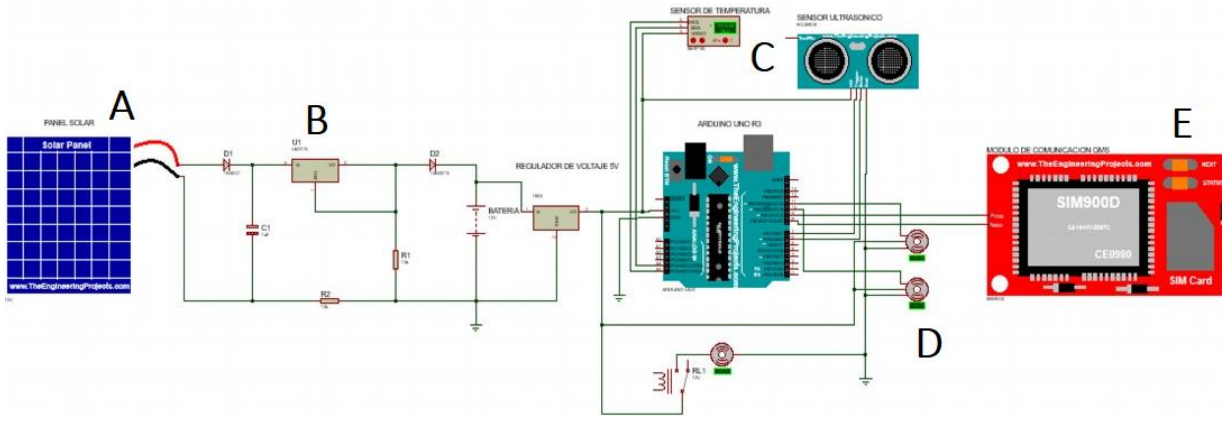


Figura 27. Diagrama eléctrico.

5. Resultados

Con base en la metodología del diseño mecatrónico se obtuvo el diseño completo del prototipo, integrando los distintos mecanismos que lo conforman en una estructura de colmena definida acorde con las necesidades planteadas. Para obtener este diseño final del prototipo se realizó lo siguiente:

- Se generaron tres posibles diseños que cumplieran con los objetivos especificados, la lista de requerimientos establecida y con base a la ponderación de objetivos se seleccionó el diseño que los cumpliera de mejor manera.

- Se diseñó una estructura de colmena automatizada para poder incorporar los componentes de control, mecánicos y electrónicos.

- Para el mecanismo, se terminó el diseño de bastidores retractiles con la capacidad de desarmar celdas de miel y romper el opérculo, el diseño completo consta de 8 bastidores de este tipo.

- Se seleccionó y diseñó, con ayuda de herramientas de software, un mecanismo de tijera que permita retraer la parte móvil de los bastidores y así hacer fluir la miel por los tubos de recolección.

- En el apartado de almacenamiento se seleccionaron botes de plástico PET con base en las especificaciones de grado alimenticio requeridas para guardar miel.

- Para el mecanismo de sistema de filtrado se planteó un diseño con malla metálica que impida el paso de agentes externos a los contenedores, así como también un cepillo impulsado por un motor lineal que limpiará la malla.

- Se diseñó un sistema de control On/Off para controlar el mecanismo de tijera que se encarga de abrir y cerrar los bastidores.

- Para la regulación de temperatura se propone un control PI que permita la variación adecuada según las condiciones de clima al interior de la colmena.

Para la validación de cada parte del diseño final de la colmena se realizó la selección final con respaldo 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 y en las partes móviles de los bastidores para observar su desplazamiento y posible deformación.

- Análisis de posición, velocidad y aceleración del mecanismo de tijera para observar el tiempo de ejecución y apreciar si actúa de la manera requerida.

- Simulaciones en softwares de construcción de equipos electrónicos para comprobar que el voltaje entregado por la fuente de alimentación sea el necesario para los componentes, así como también validar el correcto funcionamiento de éstos.

- Simulaciones del control PI de temperatura mediante Matlab.

6. Conclusiones

En este trabajo se presenta la propuesta de diseño para una colmena automatizada que permitirá el monitoreo de algunas variables de interés en el proceso de producción de miel, pero en

especial avisará al apicultor cuándo debe recoger la miel producida por las abejas. El siguiente paso será la construcción de la misma para validar el desempeño en campo, así como la viabilidad para implementar a gran escala. Para lograr los resultados descritos anteriormente se aplicó la metodología de diseño mecatrónico permitiendo obtener un diseño detallado en las áreas de control, mecánica, electrónica y procesamiento de señales para la interfaz humano-máquina. En cuanto a los componentes necesarios para la implementación del prototipo se eligieron dispositivos, sensores y actuadores con características comerciales para adquirirlos de manera sencilla y que estuvieran disponibles en el mercado local. Por último, es importante resaltar que el diseño propuesto en este artículo se ha validado a través de simulaciones de tal forma que la construcción y puesta en marcha de la colmena se realice sin necesidad de hacer rediseños o adecuaciones en la selección de componentes debido a malos cálculos.

Referencias

[1] F. de Riesgo Compartido, “Apicultura, actividad de gran importancia para la economía y el medio ambiente en México,” 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.gob.mx/firco/articulos/apicultura-actividad-de-gran-importancia-para-la-economia-y-el-medio-ambiente-en-mexico?idiom=es

[2] J. Besora Magem, “Colmena y portanúcleo tipo langstroth,” Universidad Nacional Agraria La Molina, Tech. Rep.

[3] F. for farmers, “Partes de la colmena moderna,” 2015. [En línea]. Disponible en: http://food4farmers.org/es/2015/02/25/partes-de-la-colmena-moderna/

[4] C. de la miel, “Procesado de la miel.” [En línea]. Disponible en: https://www.casadelamiel.org/es/procesado

[5] J. Alonso, “¿a quién le importa la pérdida de abejas en américa latina?” 2019. [En línea]. Disponible en: https://p.dw.com/p/3HHFa

[6] C. Anderson y A. Stuart, “Apiculture,” U.S. Patent US20 140 370 781, 6 3, 2014. [En línea]. Disponible en: https://www.freepatentsonline.com/20140370781.pdf

[7] Florea, G., & Codreanu, N. (2022). Electronic System for the Management of a Beehive. 2022 IEEE 9th Electronics System-Integration Technology Conference, ESTC 2022 - Proceedings. https://doi.org/10.1109/ESTC55720.2022.9939438

[8] Draper, A., Obrusnik, N., Zinemanas, P., Monzon, P., & Perez, N. (2016). Design and implementation of a remote monitoring system to detect contamination in beehives. CHILECON 2015 - 2015 IEEE Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, Proceedings of IEEE Chilecon 2015. https://doi.org/10.1109/Chilecon.2015.7404654

[9] Howard, D., Hunter, G., Duran, O., & Venetsanos, D. (2016). Progress towards an intelligent beehive: Building an intelligent environment to promote the well-being of honeybees. Proceedings - 12th International Conference on Intelligent Environments, IE 2016. https://doi.org/10.1109/IE.2016.60

[10] Rybin, V. G., Butusov, D. N., Karimov, T. I., Belkin, D. A., & Kozak, M. N. (2017). Embedded data acquisition system for beehive monitoring. Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2017. https://doi.org/10.1109/CTSYS.2017.8109576

[11] Hsu, K. T., Chen, C. H., Chen, Z. H., Hong, S. S., Wang, C. T., & Chen, W. P. (2021). Beehive with Low-energy of High-voltage Shock Against Killer Hornets. 2021 IEEE International Conference on Electronic Communications, Internet of Things and Big Data, ICEIB 2021. https://doi.org/10.1109/ICEIB53692.2021.9686422

[12] E. E. Soler Triana, “Sistema de monitoreo para el fomento de la producción apícola automática,” 2018-02-27. [En línea]. Disponible en: https://repository.unad.edu.co/handle/10596/30668

[13] J. C. Villajueca, “Control on/off o todo/nada,” 2019. [En línea]. Disponible en: https://instrumentacionycontrol.net/control-on-off-o-todo-nada/

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 20, pp. 254 – 265
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Diseño e Implementación de un Sistema de Fertirrigación para Cultivos Aeropónicos

Moreno Aguilera Cristal Yoselin, Martínez Nolasco Coral, Martínez Nolasco Juan José

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México
m2103036@itcelaya.edu.mx

Resumen

El agua es un recurso fundamental para el ecosistema y es indispensable para el desarrollo de la población, así mismo es un factor limitante para la producción agrícola y ganadera. Por ello es necesario implementar técnicas sustentables que nos permitan hacer un uso eficiente del agua. La aeroponía es una alternativa para realizar cultivos donde se sustituye el suelo por aire consiguiendo cultivar cualquier tipo de plantas, se utilizan cabezales de fertirrigación modernos y totalmente automatizados para el suministro oportuno de solución nutritiva, que sirve tanto para la nutrición como para el riego de las plantas. Esta técnica de cultivo busca economizar el uso y manejo del agua implementando un sistema de fertirrigación. La finalidad de este trabajo es diseñar e implementar un sistema de fertirrigación como elemento principal de un sistema aeropónico. Se presentan tres prototipos que fueron diseñados tomando en cuenta las características de crecimiento de las plantas a cultivar y que pueden adaptarse de forma multidisciplinar dentro de los hogares y dentro de invernaderos. Se seleccionaron los materiales para la construcción de los prototipos cuidando que sean de larga duración y fácil mantenimiento. Los aspersores en un sistema de fertirrigación para cultivos aeropónicos deben ser de gota fina para no estresar las raíces y deben cubrir un área considerable para garantizar que se abarque toda la raíz. Se evaluó la funcionalidad de los tres prototipos de fertirrigación durante el ciclo de cultivo de lechuga y chile jalapeño. Los resultados obtenidos muestran que las plantas durante su ciclo de cultivo presentan las características de crecimiento esperadas, lo que da la pauta a que los sistemas de fertirrigación implementados pueden ser utilizados para cultivar diferentes tipos de plantas.

Palabras clave: Fertirrigación, Aeroponía, Modelado, Dibujo asistido por computadora (CAD).

1. Introducción

La agricultura suele tener una eficiencia del uso del agua mucho menor que otros sectores productivos, lo cual quiere decir que, normalmente, la estructura económica de un país afecta en gran medida a su eficiencia general del uso del agua. Por tanto, el incremento de la productividad del agua en la agricultura constituye una intervención fundamental para mejorar la eficiencia del uso de los recursos hídricos, especialmente en los países dependientes de la agricultura. El sector agrícola ha experimentado un aumento del 8 % en su eficiencia en el uso del agua desde 2015 [1].

Las actividades agrícolas intensivas provocan la contaminación del suelo y el agua por el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas. Esto abarcando el problema de la sobreexplotación de los acuíferos y de otras formas de manejo inadecuado del agua subterránea, como el abuso en la irrigación [2].

Las demandas alimentarias actuales de la sociedad no pueden fundamentarse únicamente en el modelo de producción agrícola actual, se deben poner en práctica nuevas alternativas. La producción

de alimentos aeropónicos son una alternativa que optimiza el espacio y los recursos hídricos, así mismo reduce costos al automatizar las operaciones [3].

El fundamento de aeroponía es cultivar plantas sin suelo en un entorno cerrado o semicerrado en donde las plantas son suspendidas y las raíces son fertirrigadas con una solución rica en nutrientes [4]. Es una opción importante para la agricultura, ya que permite la producción a gran escala, utiliza menos espacio y consume menos agua y nutrientes. Los sistemas avanzados de Agricultura de Ambiente Controlado (CEA) tienen la ventaja de aprovechar la captura y reutilización del agua de riego [5].

Al no depender de la tierra no hay limitantes sobre donde cultivar ya que puede ser implementado en ciudades o lugares donde el cultivo tradicional es difícil. El componente más importante en esta técnica de cultivo es la fertirrigación, la cual permite la aplicación simultánea de agua y fertilizantes a través de un sistema de riego [6].

La fertirrigación es una tecnología eficiente que suministra agua y nutrientes, reduce la evaporación del agua y el consumo ineficaz de la solución nutritiva al transportarlos directamente a las raíces del cultivo [7], así como a aplicar la solución nutritiva en la cantidad adecuada en el momento adecuado, mejorando así el rendimiento y buscando un crecimiento óptimo del cultivo, reduciendo el gasto energía [8] y esto puede generar un impacto ambiental bajo [9].

Es importante desarrollar estrategias que disminuyan la cantidad de agua utilizada sin tener consecuencias negativas sobre la producción, ya que como se ha observado que sistemas eficientes de riego en combinación con técnicas de conservación de la humedad del sustrato son viables económicamente [10]. Por lo que, la investigación debe basarse en hacer estos sistemas ambiental y económicamente sostenibles.

La finalidad del presente trabajo es el diseño e implementación de un sistema de fertirrigación automatizado para cultivos aeropónicos que permitirá el crecimiento de plantas de invernadero.

2. Materiales y métodos

Esta sección presenta el conjunto de elementos considerados para diseñar e implementar un sistema de fertirrigación para un sistema aeropónico que permita el crecimiento de plantas en invernadero.

2.1 Diseño del sistema de fertirrigación.

Las etapas de la metodología empleada para el diseño de un sistema de fertirrigación para cultivos aeropónicos se muestran en el diagrama de la figura 1, en esta investigación se desarrollaron tres sistemas de fertirrigación con dimensiones y particularidades diferentes y para los tres se siguen los mismos pasos, que abarcan desde establecer las características del cultivo hasta la evaluación de la funcionalidad del sistema de fertirrigación.

El primer sistema de fertirrigación se diseñó para un cultivo aeropónico de lechuga, con capacidad para treinta plantas, tomando como referencia las dimensiones máximas que las hojas y las raíces pudiesen alcanzar, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Características de la planta seleccionada.

Parámetros	Hoja	Raíz
Alto o Largo	46.50 cm	54 cm
Ancho	39.03 cm	12 cm

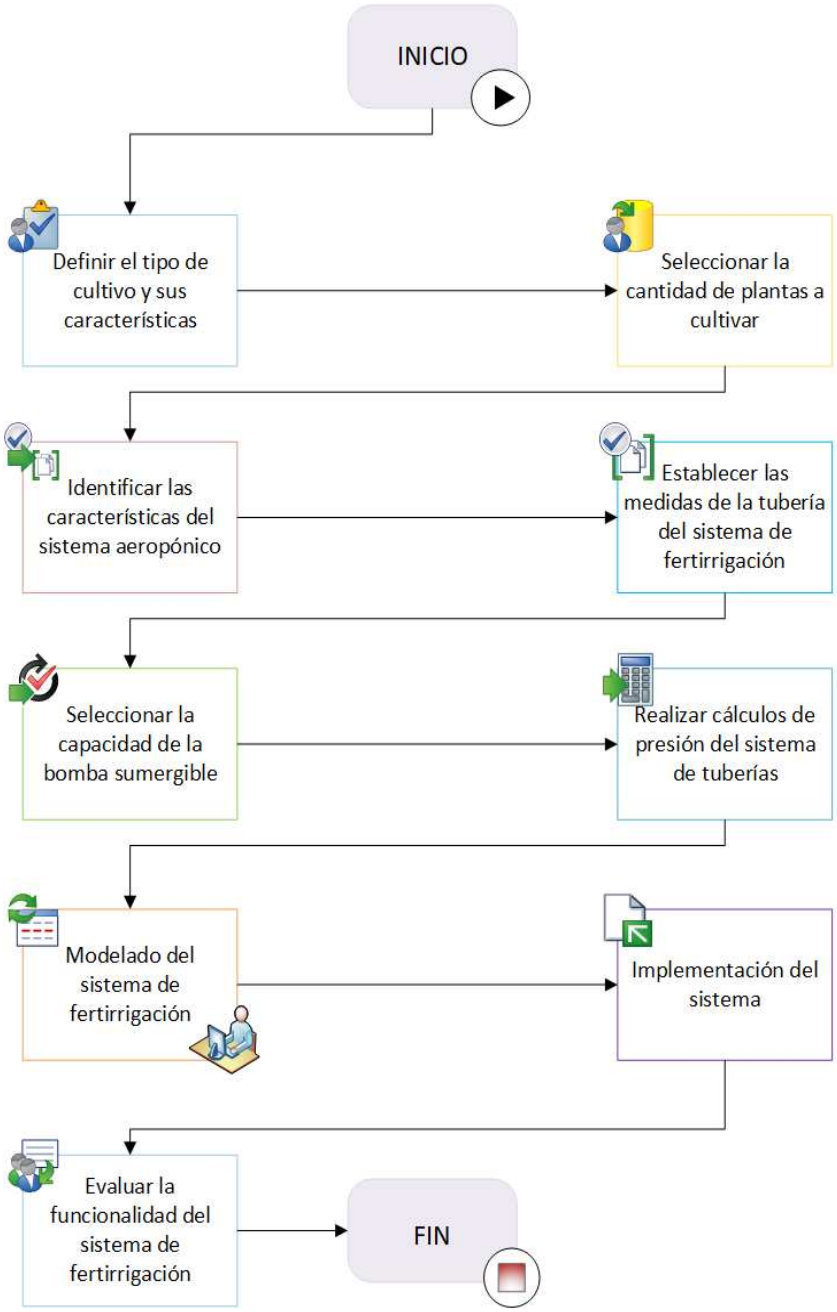


Figura 1. Metodología para el desarrollo de un sistema de fertirrigación.

De acuerdo con las dimensiones anteriores, se define que el sistema se integra por un tanque separado del sistema aeropónico, ubicado de lado derecho que tiene internamente una bomba sumergible de 1/3 de H.P, con salida de 1 pulgada conectada al interior de la cámara a un circuito cerrado de 3 vías de tubería de policloruro de vinilo (PVC) de 1 pulgada cédula 40, cada vía mide 2.55 m de largo y la separación entre sí es de 34.5 cm, cada línea está diseñada con 10 aspersores híbridos con una separación de 25 cm entre aspersor y aspersor, uno para cada planta.

Los aspersores son colocados de manera que estén alineados a la raíz de la planta y perpendiculares a la tubería que los soportan, es importante que la fertirrigación sea en forma de niebla

ya que de lo contrario daña el cultivo. Estos deben hacer llegar la cantidad de solución necesaria a las plantas sin importar su ubicación, ya que hacen que el agua se eleve en forma de brisa como en la figura 2, además mantiene una humedad constante y una temperatura adecuada en la zona radicular. El aspersor híbrido es una adaptación de nebulizadores con cabezales de atomización de ½ pulgada y una boquilla de nebulización de niebla fina ≤70 micras y flujo máximo 6.7 l / h. El sistema de fertirrigación se coloca con una separación en la que no obstruya el crecimiento de la raíz como se muestra en la figura 3.

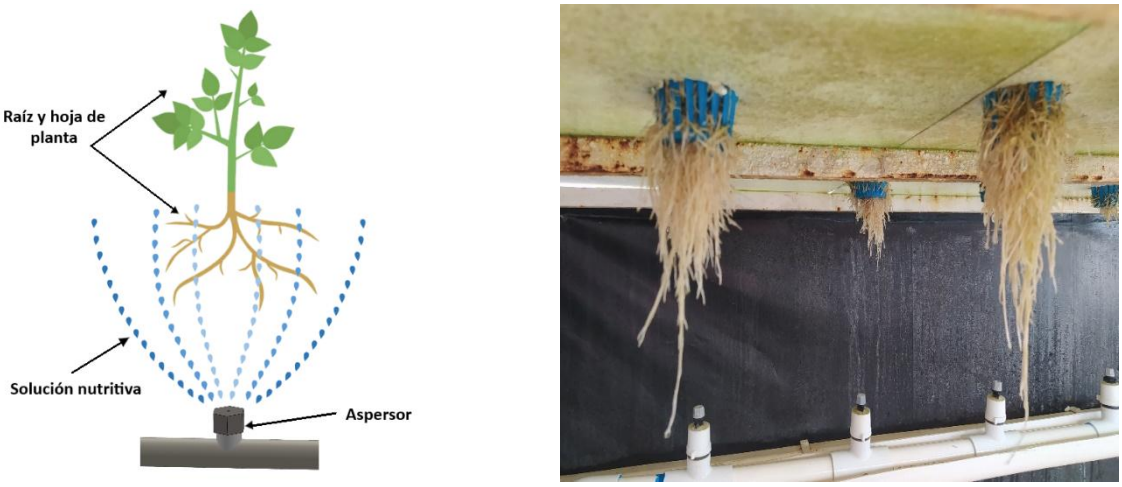


Figura 2. Fertirrigación en forma de niebla.

Una vez que los elementos del prototipo se seleccionaron se realiza el modelado en CAD (Dibujo Asistido por Computadora) utilizando el software SolidWorks, el resultado se muestra en la figura 3.

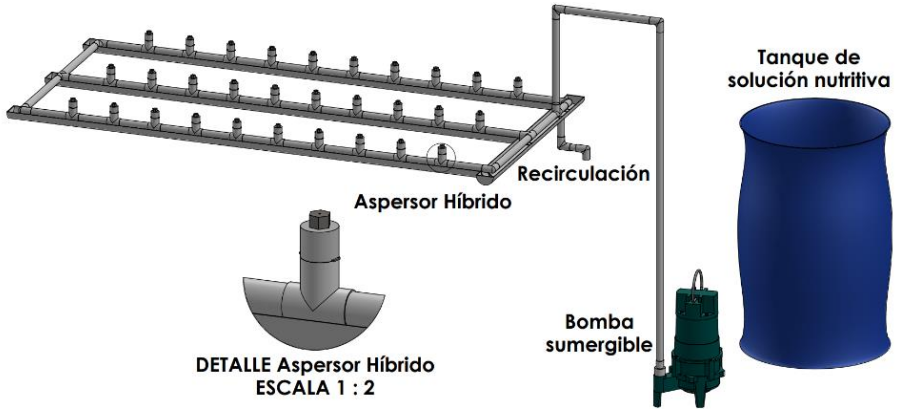


Figura 3. Sistema de fertirrigación diseñado para cultivos aeropónicos de lechuga.

La ubicación del sistema de fertirrigación dentro del sistema aeropónico se muestra en la figura 4, este se monta sobre una estructura adaptada a la cámara de crecimiento aeropónica, manteniendo alineados los aspersores con las raíces de las plantas.

Es importante que el sistema cuente con filtros como en la figura 5, en puntos específicos para poder retener suciedad que se llegue a almacenar en el tanque de solución nutritiva, la acumulación de sales provocaría la obstrucción los aspersores ya que si estos se tapan afectan a las plantas mediante estrés hídrico y puede causar daño total o parcial al cultivo. Así mismo se deben tener filtros para recircular la solución ya que es importante no regresar residuos o suciedad de las raíces.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 20, pp. 254 – 265
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

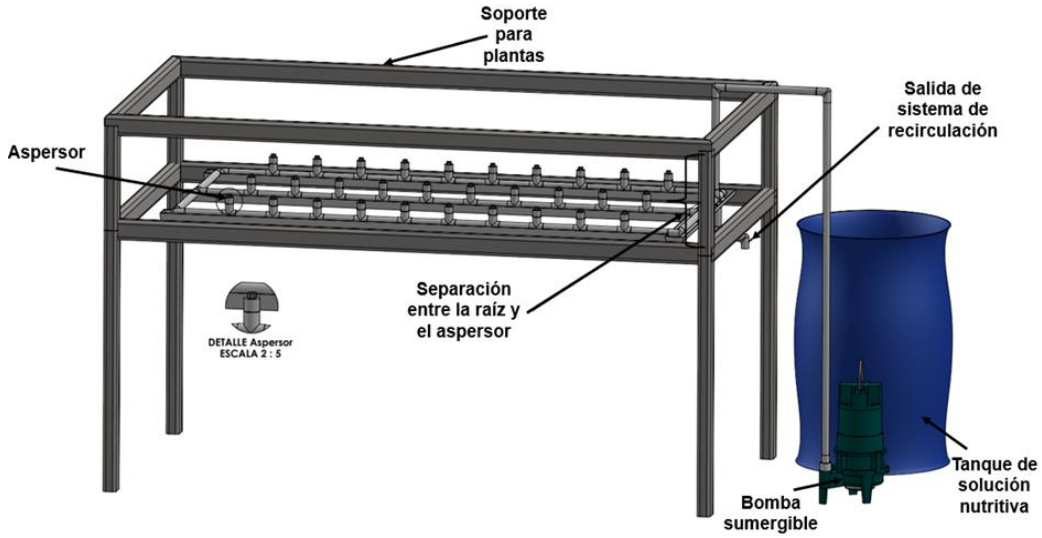


Figura 4. Modelado y ubicación del Sistema de fertirrigación.

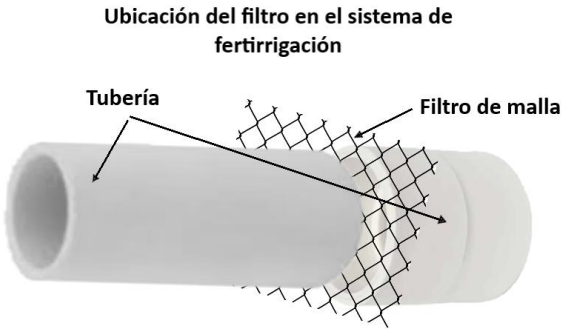


Figura 5. Filtro ubicación en el Sistema de fertirrigación.

La figura 6 muestra el sistema de fertirrigación con características adaptadas a la planta de chile jalapeño, la cual tiene mayor tamaño que la planta de lechuga, por lo que la dimensiones del sistema son: 3 m de largo de cada vía y la separación entre sí es de 45 cm, cada línea con 10 aspersores con una separación de 30 cm entre aspersores, además difiere en el tipo de aspersor utilizado ya que en este se eliminaron los nebulizadores con cabezales de atomización de ½ pulgada y solo se dejó la boquilla nebulización de niebla fina ≤70 micras esto con el fin de disminuir la presión.

2.2 Diseño hidráulico.

Para diseñar un sistema de fertirrigación se determinan elementos básicos para su dimensionamiento considerando condiciones climáticas y características del cultivo, elementos que aluden al consumo de agua, área de contacto, frecuencia de riego, duración de riego y gasto total del sistema.

El diseño hidráulico indaga el dimensionamiento más económico y eficiente del sistema y de los componentes. Tiene como finalidad seleccionar diámetro y longitudes de las tuberías, el número, separación y capacidad de los aspersores bajo un criterio de optimización.

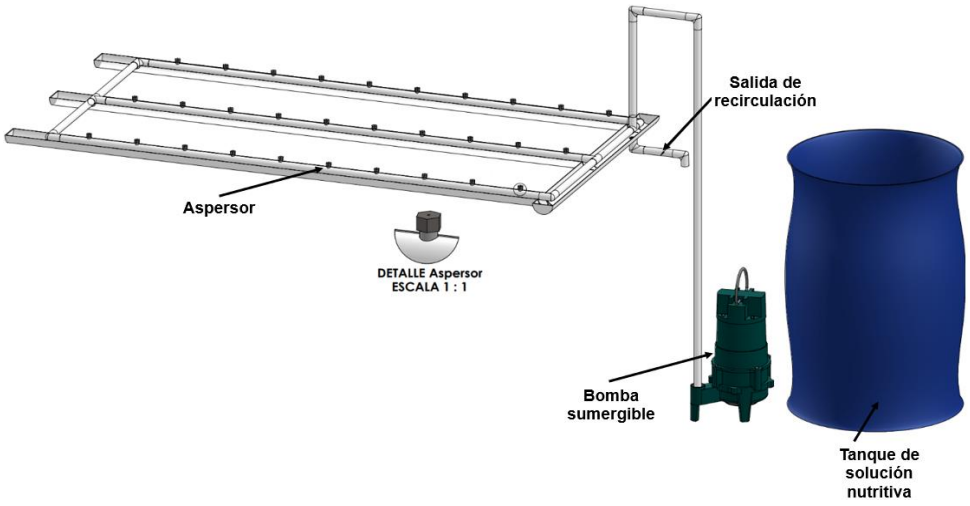


Figura 6. Sistema de fertirrigación diseñado para cultivos aeropónicos de Chile Jalapeño.

Para los tres sistemas de fertirrigación se realizaron los cálculos correspondientes empleando las ecuaciones de diseño hidráulico que se describen a continuación:

- Ecuación de Darcy-Weisbach

$$Hf = f * \left(\frac{L}{D}\right)\left(\frac{V^2}{2a}\right) \quad (1)$$

Dónde:

Hf: Pérdida de carga (mts)
f: Factor adimensional de fricción
L: Longitud del conducto (m)
D: Diámetro interno del tubo (m)
V: Velocidad promedio del fluido $(\frac{m}{s})$
g: Aceleración de la gravedad $(9.8 \frac{m}{s^2})$

$$f = \frac{0{,}32}{Re^{0{,}25}} \quad (2)$$

Dónde:

f: Factor adimensional de fricción
Re: Número de Reynolds, adimensional

$$Re = K\frac{Q}{D} \quad (3)$$

Dónde:

K: Es una constante, $1{,}26 \times 10^6$ para agua a $20℃$
D: Diámetro interno (mm)
Q: Caudal $(\frac{L}{s})$

- Hazen-Williams

$$H = 10.674 * \left[\frac{Q^{1,852}}{(C^{1,852} * D^{4,871})}\right] * L \quad (4)$$

H: Pérdida de carga o de energía (m)
Q: Caudal $(\frac{m^3}{s})$

C: Coeficiente de rugosidad (adimensional)
D: Diámetro interno de la tubería (m)
L: Longitud de la tubería (m)

- Pérdida de carga en singularidades

$$H = \left(\frac{V^2}{2g}\right) \tag{5}$$

H: Pérdida de carga o de energía (m)
K: Coeficiente empírico (adimensional)
V: Velocidad media del flujo ($\frac{m}{s}$)

Los resultados matemáticos se expresan en la tabla 2 utilizando para el sistema 1: Q = 2.783 L/s, C = 150, D = 0.0254 m, L = 9.03 m y V = 6.663×10^{-6} m^3/s, para el sistema 2: Q = $1.410 \times 10^{-6}\ m^3$, $2.783\ L/s$, C = 150, D = 0.0254 m, L = 10.4 m, V = 6.663×10^{-6} m^3/s, para el sistema 3: Q = $1.231 \times 10^{-7}\ m^3$, $0.972\ \frac{L}{s}$, C = 150, D = 0.0127 m, L = 2.7 m, V = 9.722×10^{-4} m^3/s.

Tabla 2. Resultados del diseño hidráulico para los tres sistemas de fertirrigación.

Sistema de fertirrigación	Hazen-Williams	Darcy-Weisbach
1	$H = 7.732 \times 10^{-6} \frac{m^3}{min}$	$Hf = 4.131 \times 10^{-7} \frac{m^3}{s}$
2	$H = 8.905 \times 10^{-6} \frac{m^3}{min}$	$Hf = 4.757 \times 10^{-7} \frac{m^3}{s}$
3	$H = 6.765 \times 10^{-5} \frac{m^3}{min}$	$Hf = 3.021 \times 10^{-8} \frac{m^3}{s}$

3. Resultados

El diseño final del sistema de fertirrigación se logró después de realizar diferentes experimentos de cultivo de lechuga y chile jalapeño, obteniendo cultivos favorables de las dos plantas. Conforme transcurrían los cultivos se analizaron y se realizaron las mejoras en el sistema de fertirrigación, ver figura 7. Está diseñado para uso multidisciplinar y es desmontable, se puede utilizar para cultivos en hogares, dentro de invernaderos y se puede transportar para fin demostrativo.

Para ello la bomba sumergible puede colocarse en dos posiciones diferentes dependiendo del lugar y uso que se le asignará. Este sistema de fertirrigación se integra por un tanque separado del sistema aeropónico, con una bomba sumergible de 60 Watt, con salida de 1/2 pulgada conectada al interior de la cámara a un circuito cerrado de 3 vías de tubería de policloruro de vinilo clorado (CPVC) de 1/2 pulgada cédula 40, cada vía mide 68 cm de largo y la separación entre sí es de 15 cm, cada línea está diseñada con 4 aspersores con boquilla de nebulización de niebla fina ≤70 micras, estos con una separación de 14 cm entre cada aspersor, se incorpora a una vía una salida con tuerca unión de ½ pulgada que permite que se conecte o no la bomba sumergible.

Las plantas obtenidas utilizando el sistema de fertirrigación tienen las características y la calidad adecuada para su consumo. Una de las desventajas de esta técnica contra cultivos tradicionales es el costo alto de instalación, el sistema final de la figura 8 tuvo un costo aproximado de $4650 pesos, el

costo de un sistema oscila dependiendo del tamaño y tipo de materiales utilizados, la inversión es redituable ecológicamente y al ofrecer productos más sanos.

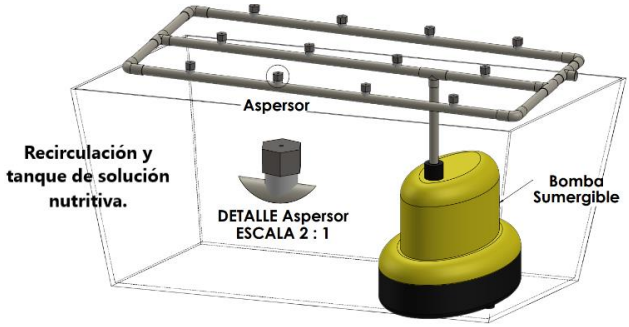


Figura 7. Modelado del prototipo final del sistema de fertirrigación.

Figura 8. Cámara de crecimiento aeropónica final.

El consumo de solución nutritiva monitoreado durante los cultivos se obtuvo basado en el tiempo de fertirrigación del sistema. Como ejemplo, durante el cultivo de chile jalapeño se emplearon tres tiempos de fertirrigación mostrados en la figura 9.

Figura 9. Tiempos utilizados en el sistema de fertirrigación.

El tanque de solución nutritiva se llenó inicialmente con 120 litros y cada tercer día se rellenó con 40 litros o lo necesario para llegar a los 120 litros iniciales, el consumo de solución nutritiva se monitoreo durante el ciclo de cultivo dentro de la cámara de crecimiento y se registró un gasto en el primer tiempo de fertirrigación de aproximadamente 15 litros diarios y en el segundo tiempo de 22 litros aproximados diarios.

Teniendo en cuenta la cantidad de agua gastada en el sistema semanalmente, se realizó el gasto total de solución nutritiva durante el cultivo. En la tabla 2 se muestran los componentes y el gasto total en litros de la solución nutritiva durante el cultivo.

Tabla 2. Gasto en litros de solución nutritiva durante el cultivo.

Componentes de la Solución Nutritiva				
Detalle	**Crecimiento de la plántula**	**Crecimiento Vegetativo**	**Cosecha**	**Total**
Agua	693.8498	763.1358	1069.9738	2526.9594 L
Nutrientes	7.01	7.71	10.81	25.53 L
Ácido nítrico	0.1402	0.1542	0.2162	0.5106 L

En las figuras 10 y figura 11 se observa el sistema de fertirrigación implementado en un sistema aeropónico para cultivo de lechuga y de chile jalapeño, respectivamente. Los cultivos se implementaron dentro de invernaderos para proteger a los cultivos de condiciones ambientales no deseadas y de posibles plagas. En la figura 12 se muestra el invernadero en donde se desarrolló la investigación para los cultivos aeropónicos, este se utilizó con la finalidad de proteger los cultivos de plagas, de daños ambientales y manteniendo las características adecuadas para el crecimiento de la planta.

Figura 10. Sistema de fertirrigación para lechuga en sistema aeropónico.

Figura 11. Sistema de fertirrigación para chile jalapeño implementado en invernadero.

Se desarrollaron 7 cultivos de lechuga y 4 de chile jalapeño, todos los experimentos dentro de invernaderos, con las características de iluminación adecuadas para su crecimiento. Se midió la intensidad de la luz dentro del invernadero, la media es de 16.515,08 lux durante un fotoperiodo aproximado de 12 h en la ciudad de Celaya, Guanajuato. Ver figura 12.

Figura 12. Invernadero de investigación con cámaras de crecimiento aeropónico.

4. Conclusiones

El diseño y la implementación del prototipo favorece el cultivo de plantas aeropónicas. Es importante establecer una metodología que facilite establecer el tiempo de fertirrigación adecuado para las plantas. Para la presente investigación se trabajó con cultivos de lechuga y chile jalapeño, la diferencia entre ambos tipos de cultivos es que en el primero solo se da crecimiento vegetativo y en el segundo hay floración y fructificación. Los cultivos de lechuga y chile jalapeño de desempeñan con tiempos de fertirrigación diferentes debido a las necesidades del tipo de planta y para ambos cultivos se obtuvieron resultados del desarrollo de la planta favorables, lo que da la pauta a que el sistema aeropónico es eficiente para plantas de características similares. Los tiempos aplicados esclarecen que la fertirrigación puede mejorar significativamente el rendimiento de los cultivos. Entregar la cantidad necesaria de solución nutritiva depende notablemente en el crecimiento de las plantas en todas las etapas del desarrollo. Recircular la fertirrigación es un medio eficaz para conservar recursos como el agua y nutrientes.

Referencias

[1] European Environment Agency, EEA, 2020.
[2] Lévesque, S., Graham, T., Bejan, D., & Dixon, M. (2022). Comparative analysis of regenerative in situ electrochemical hypochlorination and conventional water disinfection technologies for growing ornamental crops with recirculating hydroponics. Agricultural Water Management, 269. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107673
[3] Hoyos, F. E., & Candelo Becerra, J. E. (2019). Automation of pesticide-free cilantro aeroponic crops. INGE CUC, 15(1), 123-132.

[4] Nahle Martínez, A., & Álvarez Reyna, V. D. P. (2014). Diseño y automatización de un sistema de riego para la productividad de cultivo en invernadero.
[5] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO,2022.
[6] Guerrero Vivas, J. A. (2021). Sistema de irrigación para banco de pruebas de cultivo hidropónico sin suelo.
[7] Pandey, K., Singh, K. G., & Singh, A. (2023). Multi-Sensors based smart nutrient reuse management system for closed soilless culture under protected cultivation. Computers and Electronics in Agriculture, 204, 107495.
[8] Venezia, A., Colla, G., Di Cesare, C., Stipic, M., & Massa, D. (2022). The effect of different fertigation strategies on salinity and nutrient dynamics of cherry tomato grown in a gutter subirrigation system. Agricultural Water Management, 262, 107408.
[9] Wang, M., Dong, C., & Gao, W. (2019). Evaluation of the growth, photosynthetic characteristics, antioxidant capacity, biomass yield and quality of tomato using aeroponics, hydroponics and porous tube-vermiculite systems in bio-regenerative life support systems. Life Sciences in Space Research, 22, 68–75. https://doi.org/10.1016/j.lssr.2019.07.008
[10] Ortiz Urrea, O. A. (2021). Respuesta del cultivo hidropónico de rosa a diferentes Kc y láminas fraccionadas de fertirriego.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 21, pp. 266 - 274
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Diseño y Desarrollo de una Pulsera Inteligente para el Cuidado de la Salud

Simental Martinez Omar Alejandro[1], Guerrero Osuna Héctor Alonso[2], Ornelas Vargas Gerardo[3], Luis Fernando Luque Vega[4], Antonio del Rio de Santiago[5]

[1]Posgrado en Ingeniería y Tecnología Aplicada, Universidad Autónoma de Zacatecas
[2]Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales, ITESO AC
33145571@uaz.edu.mx

Resumen

En la actualidad uno de los objetivos principales para México, asi como todo el mundo, es mantener una vida saludable, siendo esto de gran ayuda para evitar el desarrollo de enfermedades y mantener bajo control a pacientes que ya las presenten. Es por esta razón que el sector médico busca alternativas que les brinde una ayuda en el proceso de monitoreo y atención de los pacientes. En hospitales se cuenta con el personal médico capacitado, necesario para mantener un control de cierta cantidad de pacientes, sin embargo, las inferencias de personal responsable y la sobre demanda a la que se han enfrentado por el reciente COVID-19, han representado un gran desafío para mantener el cuidado de pacientes. Por ese motivo se describe el diseño, desarrollo e implementación de un dispositivo vestible para el monitoreo remoto con conectividad a internet de las cosas que permite a los usuarios disponer de mediciones en tiempo real mediante una interfaz gráfica en la que el personal médico podrá visualizar con menor riesgo de contagio o de exposición, a los datos obtenidos, reduciendo la propagación de enfermedades, costos de contratación de personal y aumentando la calidad de vida de las personas.

Palabras clave: Cuidado de la salud, Internet de las cosas, COVID-19, Dispositivo Vestible, Sistemas embebidos, monitoreo, Industria 4.0, Temperatura Corporal.

1. Introducción

Un requisito importante para la solución del monitoreo de los signos vitales de pacientes o personas mayores, desde sus hogares como en hospitales. Es el uso de sensores combinados con comunicación inalámbrica, como medio para mejorar la calidad de vida de los pacientes [1]. Para esto el internet de las cosas es una tecnología no invasiva con muchas aplicaciones para sensores, el uso de tecnologías IoT (Internet de las Cosas) es importante para el cuidado de la salud, asi como también para aplicaciones en pequeñas ciudades y zonas de agricultura [2].

Internet de las cosas es un entorno de trabajo que emplea sensores, dispositivos y actuadores. Un sector importante dentro de la revolución del IoT es el sector salud, donde esta tecnología se presta a una gran variedad de aplicaciones y servicios para mejorar la calidad de vida de las personas [3]. Los bosques de redes neuronales de IoT provee de un amplio rango de aplicaciones inteligentes en ambientes con las capacidades necesarias para el procesamiento y la comunicación de datos. El uso de técnicas como machine learning (ML) o deep learning (DL) juega un importante rol en diferentes campos como la agricultura, la medicina e industrias autónomas [4]. La implementación de una red de sensores inalámbricos vestibles que trabajan entorno al cuerpo humano utiliza una antena que facilita la comunicación en espacios abiertos, ropa y sobre el tejido humano. Comprendiendo que se precisa un sistema pequeño, que emplea fuentes de energía limitadas y de reducidas dimensiones, todo esto para que el dispositivo sea cómodo y no limite el movimiento del paciente [5].

El uso de tecnologías como el machine learning ha tenido un reconocible aumento en aplicaciones del cuidado de la salud. Una aplicación importante es la detección y prevención de epilepsia, por medio de dispositivos vestibles [6]. El uso de biosensores vestibles ha recibido una gran cantidad de atención con el paso de los años, esto dentro del apartado del cuidado de la salud, abarcando el monitoreo de signos vitales tales como la frecuencia cardiaca, la presión de sangre y la temperatura corporal. Hoy en día el incremento en la popularidad de estos dispositivos en la industria de la medicina ha tenido un cambio drástico, centrado en el desarrollo de biosensores que otorgan un monitoreo de signos vitales en tiempo real, prevén y controlan una variedad de enfermedades crónicas [7].

El cuidado de la salud ha sido el medio para la revolución tecnológica que presento avances en tecnologías del cuidado de la salud remotos, siendo estos utilizados en áreas médicas. Las técnicas del cuidado de salud móvil se refieren a ciertos métodos y herramientas que brindan la lectura y recolección de datos en individuos, a través de aplicaciones para dispositivos móviles inteligentes que se comunican con el dispositivo vestible. Estos dispositivos vestibles son usados sobre el cuerpo en contacto directo o cerca de la superficie de la piel, todos estos dispositivos son utilizados por personal médico para mantener un monitoreo y proveer intervenciones rápidas o pasivas para cuantificar las señales biológicas atípicas [8].

Las nuevas tecnologías han generado una gran diversidad de productos disponibles, esto ayuda a mejorar su aceptación especialmente desde el punto de vista financiero, el éxito de las aplicaciones para el cuidado de la salud está determinado por el correcto uso del mismo, no solo de la aceptación tecnológica [9]. Particularmente los dispositivos vestibles con sensores integrados, que generan señales eléctricas como reacción a impulsos generados por fenómenos físicos, son ampliamente utilizados en empresas del sector salud, como la medicina, cuidado de la salud y deporte. La implementación de métodos y algoritmos, formulados específicamente para el cuidado de la salud, han proyectado un constante aumento en la actualización y rediseño de las versiones en la evolución de este tipo de dispositivos inteligentes [10].

De acuerdo con la Organización mundial de la salud (OMS), las enfermedades crónicas cardiovasculares representan un 75% de todas las muertes alrededor del mundo. Por esto se han formulado diferentes estrategias para el monitoreo y el diagnostico de estas enfermedades, implementando por su parte estrategias efectivas para el cuidado de la salud [11].

La gran proliferación de sensores, dispositivos y las aplicaciones de IoT basadas en sensores para el reconocimiento de actividad, han sido de gran influencia para la implementación de algoritmos como el aprendizaje profundo que ha demostrado su eficiencia en muchas áreas y además se han investigado muchos métodos profundos para abordar los desafíos de reconocimiento de actividades. Algunos métodos de aprendizaje automático han sido empleados para el reconocimiento de actividades humanas, ya que este campo sigue enfrentando algunos cambios técnicos, algunos de los cuales emplean otros algoritmos de reconocimiento como la visión por computadora y el procesamiento del lenguaje natural [12].

2. Trabajos Relacionados

En esta sección se presentan algunos de los trabajos que se han implementado para su uso en los sectores primarios y los cuales fueron influencia para el desarrollo de este trabajo.

En el trabajo presentado en [13], una comparación de las mediciones en distintas partes del cuerpo, con respecto a la temperatura corporal. Haciendo uso de sensores infrarrojos recopilan las mediciones en la frente, los oídos y las muñecas de pacientes, mostrando la correlación entra la medición de cada uno de estas zonas y comprobando la precisión de los sensores utilizados. El monitoreo de pacientes con sensores no invasivos ha sido de los predilectos desde el año 2020, ya que estos brindaban seguridad a la hora de tomar las mediciones de la temperatura corporal sin contacto. Esto formulo soluciones eficientes en tiempos de pandemia por COVID-19, aunque los resultados

obtenidos fueron cuestionables ya que la gran proliferación de sensores de uso no médico, repercutió en la toma de mediciones imprecisas. Este trabajo se centra en el término largo del monitoreo de la temperatura corporal como una ayuda a la hora de brindar mejores herramientas para lidiar con pandemias y problemáticas referentes a la temperatura corporal [14].

La temperatura corporal es una de las variables más empleadas a la hora de diagnosticar diferentes enfermedades e infecciones, por otra parte, los sensores infrarrojos han sido constantemente desarrollados y mejorados para superar las adversidades en las que se encontraban, por ejemplo, no hacer mediciones sin contacto, el estudio mostrado en [15] que contempla las utilidades y las limitantes del uso de sensores infrarrojos en aplicaciones médicas lo podemos. Las mediciones de temperatura tomadas en el núcleo corporal son consideradas de las mejores formas de analizar la temperatura en los órganos internos y en el cuerpo humano, el trabajo expuesto en [16], contempla los mejores lugares para tomar la medición de la temperatura anatómica y se comprende el uso de sensores invasivos y no invasivos para el control de la medición de la temperatura y relacionados. Para el diseño, desarrollo e implementación de dispositivos de medición se contempla la necesidad de tener conocimientos de actividad física, fisiología y conocimientos clínicos para implementar un correcto diseño de dispositivos de medición. Algunas alternativas para medición de temperatura con sensores infrarrojos, termoacopladores, termistores y mediciones térmicas por medio de fibras ópticas son analizadas en [17].

3. Materiales Y Métodos

3.1 Desarrollo del Sistema.

El sistema propuesto está conformado por tres módulos lógicos de funcionamiento, el módulo de monitoreo y recolección de datos, el módulo de procesamiento de datos y la plataforma en línea para Internet de las Cosas. El módulo de monitoreo y recolección de datos está conformado por sensores de temperatura, que recopila datos que son enviados y procesados por un microcontrolador para subirlos y almacenarlos en la nube. Los datos pueden ser observados en la plataforma www.thingspeak.com [18] para su constante monitoreo, las figuras 1 y 2 proporciona un marco general del sistema propuesto.

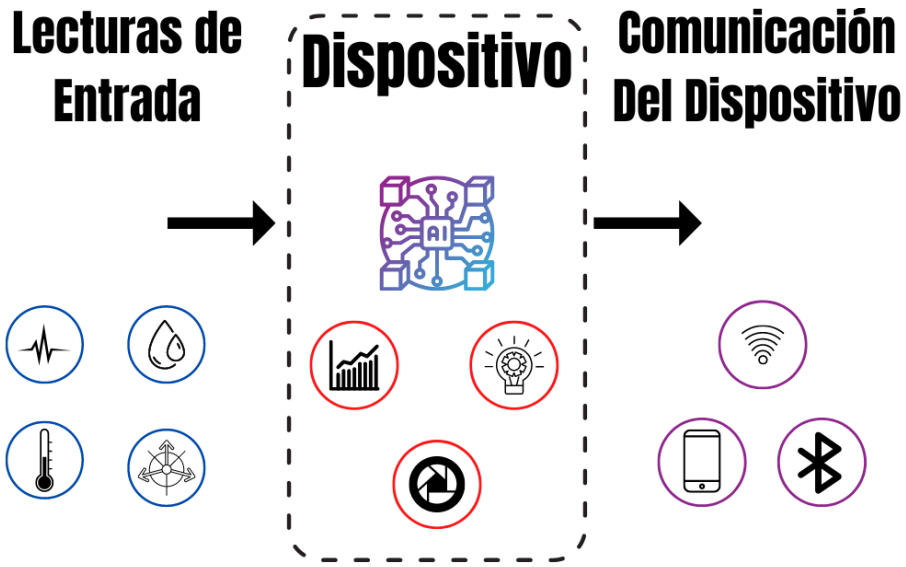


Figura 1. Flujo de comunicación y análisis del sistema.

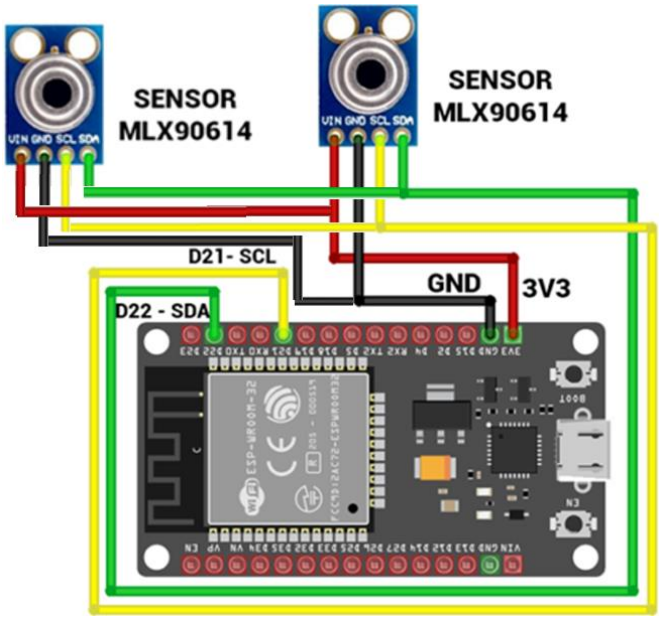


Figura 2. Conexiones entre el sensor MLX90614 y ESP32.

3.2 Módulo de Monitoreo y Recolección de Datos.

El objetivo del módulo de monitoreo y recolección de datos es tomar las mediciones de los sensores de temperatura, que se encuentran ubicados en la frente y la muñeca de los usuarios. Para cumplir con este objetivo se utiliza un ESP32, el cual es un microcontrolador de 32 bits, que tiene soporte para comunicaciones seriales como UART, I2C y SPI, donde el protocolo I2C proporcionó los periféricos necesarios para el desarrollo del prototipo. Parte de las bondades que suministra el protocolo I2C es el facilitar la recepción y transmisión de datos de todos los sensores ya que estos trabajan en la misma línea. Para el correcto funcionamiento del sistema embebido se debió cambiar la configuración de identificación de los sensores, ya que, al ser dos sensores iguales, el protocolo de comunicación I2C los reconoce como un mismo dispositivo. En la figura 2 se puede apreciar la interconexión de los periféricos con el microcontrolador, el cual se tomó de base para el diseño del dispositivo como un sistema vestible.

3.3 Módulo de procesamiento de datos

En la recolección de datos se recomienda la toma de 10 lecturas por segundo debido a las limitaciones del sensor, el microcontrolador hace un promedio de los datos obtenidos además de descartar posibles datos erróneos y así entregar un valor preciso de las mediciones recopiladas. A la hora de hacer pruebas en el campo se toman mediciones de aproximadamente 30 minutos por persona almacenándolos en la nube cada 15 segundos nuevamente limitado por la plataforma en la nube. El intervalo de 30 minutos por personas cubre un amplio rango de valores que proporciona información que no es solo puntual como se presenta en otros trabajos relacionados.

ThingSpeak es una plataforma en la nube especializada para proyectos de IoT e industria 4.0. Facilita la gestión de los sensores del dispositivo en el momento, gestionar canales de transmisión, conexiones MQTT, graficar para el análisis de datos y el almacenamiento de los datos. Estas plataformas en la nube permiten la gestión de proyectos o dispositivos conectados a la red y proporciona la posibilidad de utilizar “Dashboards” que son de utilidad para la visualización de la información, cuenta además con medidores, botones e imágenes. Como la gran mayoría de las plataformas en la nube, permite la comunicación de diferentes dispositivos, como dispositivos móviles, facilitando la recolección autónoma y gestionando alertas y notificaciones.

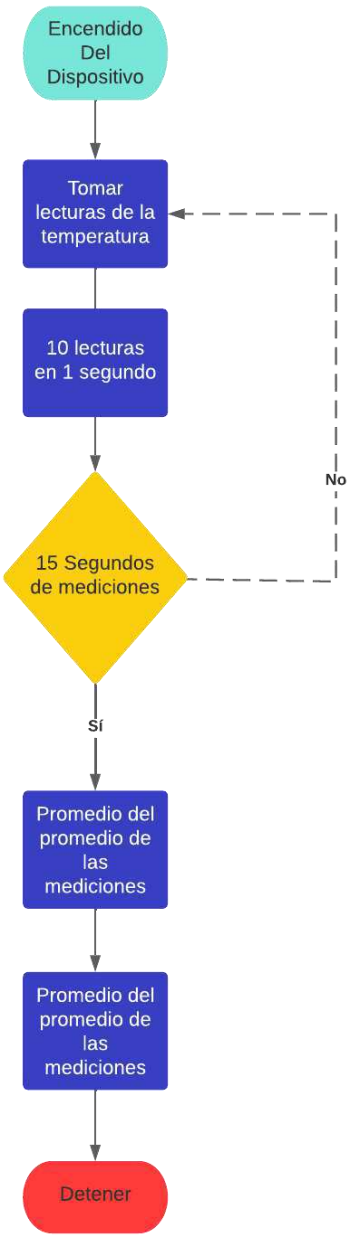


Figura 3. Diagrama de Flujo del procesamiento de datos.

Figura 4. Implementación y montaje del dispositivo.

3.4 Plataforma de IoT.

Para lograr la comunicación entre el dispositivo y la plataforma en la nube es necesario hacer uso de las llaves o claves, API Key que nos facilitan la comunicación, al contar con las claves para lectura o escritura de datos. Donde API Key es la interfaz de programación de aplicaciones, el cual es un identificador que sirve para la autentificación de un usuario para el uso de un servicio.

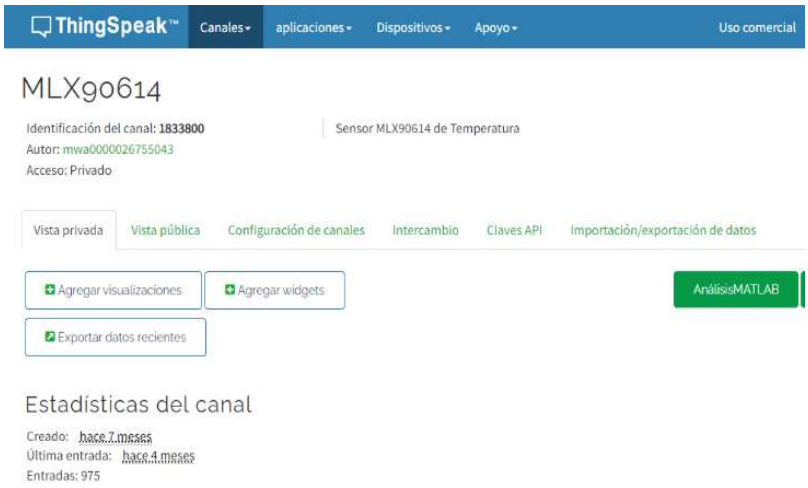


Figura 5. ThingSpeak, plataforma IoT para el almacenamiento de datos en la nube.

Las llaves son colocadas en el sistema embebido del dispositivo y haciendo uso de la comunicación wifi, se logra el emparejamiento entre el dispositivo y la plataforma en la nube.

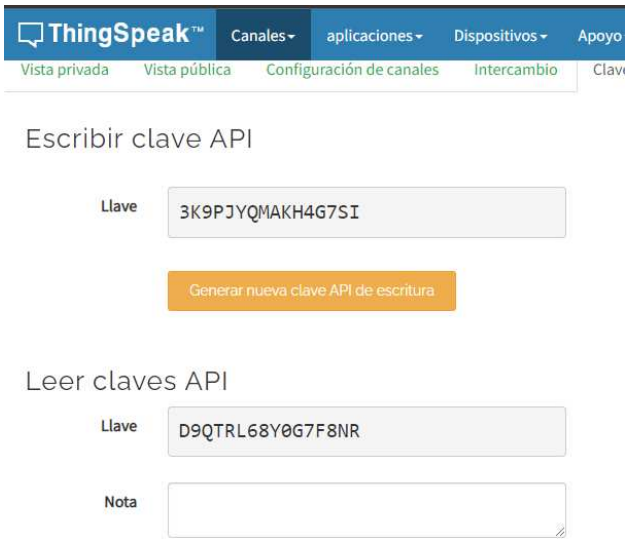


Figura 6. Llaves para escritura y lectura de datos almacenados en la plataforma IoT.

Para la visualización de la información se implementó un gráfico de línea, que se va actualizando conforme se vayan almacenando los datos, además de un monitor que muestra el último valor almacenado de cada uno de los sensores. Esta plataforma hace una recolección de datos cada 15 segundos, por lo tanto, el dispositivo se encarga de sacar los valores obtenidos, procesarlos y entregar a la plataforma IoT un promedio o el valor más acertado a la temperatura real.

Además, lo anteriormente mencionado, la plataforma cuenta con un apartado donde se almacenan todos los datos ingresados, como un historial, y se mantienen ahí mientras la plataforma siga en uso, debido a que es una plataforma gratuita solo se puede vincular 4 dispositivos al mismo tiempo. Sin embargo, de momento esto no supone un problema ya que las mediciones son recopiladas en tiempo y localizaciones diferentes, por lo que podemos cubrir una amplia cantidad de personas, en un cierto intervalo de tiempo. Además, la información puede ser descargada y guardada localmente.

4. Resultados

El dispositivo de cuidado de salud remoto permite a los usuarios visualizar continuamente las condiciones actuales de su calidad de vida, mediante la plataforma IoT ThingSpeak que ha sido implementada. Los datos medidos fueron comparados entre ellos para comprender la variación de la temperatura en esas diferentes zonas. La diferencia entre los datos medidos en el sensor de temperatura es de 3°C aproximadamente, esto se entiende por el estudio de las diferentes zonas para medir temperatura corporal. Los datos que fueron almacenados se encuentran en un archivo .csv para su análisis fuera de línea. En las figuras 7 y 8 se puede visualizar la información de los sensores de temperatura.

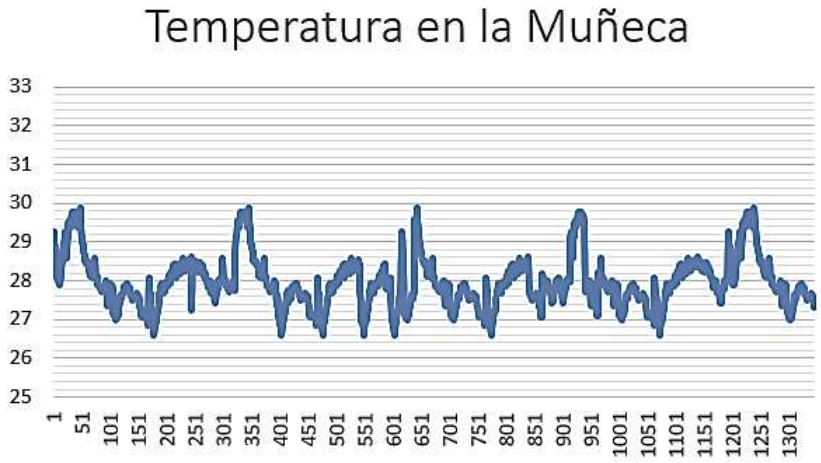


Figura 7. Sensor MLX90614 Medición de la temperatura en la muñeca.

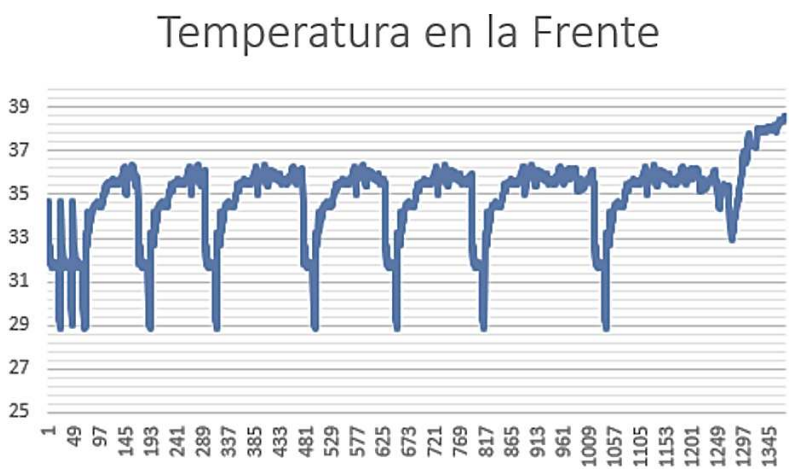


Figura 8. Sensor MLX90614 Medición de la temperatura en la frente.

5. Conclusiones

En este trabajo, se describe la implementación de un sistema de cuidado de salud remoto, con el continuo monitoreo de los sensores de temperatura corporal, ubicados en la frente y la muñeca de las personas a medir, enviando los datos obtenidos a un microcontrolador. El microcontrolador sube la información a la plataforma ThingSpeak.com, donde el personal es capaz de observar la información desde sus dispositivos móviles, así como computadoras, de modo que se tiene un monitoreo constante y ver el estado actual del paciente. La implementación de este dispositivo nos permitió visualizar el gran potencial de desarrollo en el área de la biomecatrónica, se busca desarrollar mejoras para posteriormente aplicarlas, algunas de las mejoras planteadas son, incluir más sensores para el monitoreo de signos vitales, como la frecuencia cardiaca, la oxigenación de la sangre y por último una unidad lógica aritmética. Todo esto para el desarrollo de algoritmos que sean capaces de analizar las actividades que realiza el usuario, como caminar, correr o dormir. El sistema aun esta siendo implementado en laboratorios de sensores y siendo de utilidad en el campo médico.

Referencias

[1] Werner, J. (2014). Measurement of Temperatures of the Human Body. Comprehensive Biomedical Physics, 5, 107–126. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53632-7.00515-3
[2] Spinsante, S., Samanta, B., Al-Kahtani, M. S., Khan, F., & Taekeun, W. (2022). Application of Internet of Things and Sensors in Healthcare. Sensors 2022, Vol. 22, Page 5738, 22(15), 5738. https://doi.org/10.3390/S22155738
[3] Monton, J. L. B., Martinez-Millana, A., Han, W., Fernandez-Llatas, C., Sun, Y., & Traver, V. (2018). Wearable Sensors Integrated with Internet of Things for Advancing eHealth Care. Sensors 2018, Vol. 18, Page 1851, 18(6), 1851. https://doi.org/10.3390/S18061851
[4] Ullah, S., Ahmad, J., Khan, M. A., Alkhammash, E. H., Hadjouni, M., Ghadi, Y. Y., Saeed, F., & Pitropakis, N. (2022). A New Intrusion Detection System for the Internet of Things via Deep Convolutional Neural Network and Feature Engineering. Sensors 2022, Vol. 22, Page 3607, 22(10), 3607. https://doi.org/10.3390/S22103607
[5] Januszkiewicz, Ł., di Barba, P., & Hausman, S. (2020). Optimal Design of Switchable Wearable Antenna Array for Wireless Sensor Networks. Sensors 2020, Vol. 20, Page 2795, 20(10), 2795. https://doi.org/10.3390/S20102795
[6] Januszkiewicz, Ł., di Barba, P., & Hausman, S. (2020). Optimal Design of Switchable Wearable Antenna Array for Wireless Sensor Networks. Sensors 2020, Vol. 20, Page 2795, 20(10), 2795. https://doi.org/10.3390/S20102795
[7] Januszkiewicz, Ł., di Barba, P., & Hausman, S. (2020). Optimal Design of Switchable Wearable Antenna Array for Wireless Sensor Networks. Sensors 2020, Vol. 20, Page 2795, 20(10), 2795. https://doi.org/10.3390/S20102795
[8] Leroux, A., Rzasa-Lynn, R., Crainiceanu, C., & Sharma, T. (2021). Wearable Devices: Current Status and Opportunities in Pain Assessment and Management. In Digital Biomarkers (Vol. 5, Issue 1). https://doi.org/10.1159/000515576
[9] Lee, S. M., & Lee, D. H. (2020). Healthcare wearable devices: an analysis of key factors for continuous use intention. Service Business, 14(4). https://doi.org/10.1007/s11628-020-00428-3
[10] Chen, H. Y., Chen, A., & Chen, C. (2020). Investigation of the Impact of Infrared Sensors on Core Body Temperature Monitoring by Comparing Measurement Sites. Sensors 2020, Vol. 20, Page 2885, 20(10), 2885. https://doi.org/10.3390/S20102885
[11] Švantner, M., Lang, V., Skála, J., Kohlschütter, T., Honner, M., Muzika, L., & Kosová, E. (2022). Statistical Study on Human Temperature Measurement by Infrared Thermography. Sensors 2022, Vol. 22, Page 8395, 22(21), 8395. https://doi.org/10.3390/S22218395
[12] Jayne, D., Culmer, P., Tesař, J., Muzika, L., Skála, J., Kohlschütter, T., & Honner, M. (2023). Measurement and Processing of Thermographic Data of Passing Persons for Epidemiological Purposes. Sensors 2023, Vol. 23, Page 2945, 23(6), 2945. https://doi.org/10.3390/S23062945
[13] Svantner, M., Lang, V., Skala, J., Kohlschutter, T., Honner, M., Muzika, L., & Kosova, E. (2022). Possibilities and limits of human temperature measurement by thermographic methods. 2022 IEEE

International Workshop on Metrology for Living Environment, MetroLivEn 2022 - Proceedings, 29–33. https://doi.org/10.1109/METROLIVENV54405.2022.9826942

[14] Hymczak, H., Gołąb, A., Mendrala, K., Plicner, D., Darocha, T., Podsiadło, P., Hudziak, D., Gocoł, R., & Kosiński, S. (2021). Core temperature measurement—principles of correct measurement, problems, and complications. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(20). https://doi.org/10.3390/IJERPH182010606

[15] Kim, D. W., Zhang, H. Y., Yoo, J. hyoung, Park, Y. S., Song, H. J., & Yang, K. H. (2019). The correlation between tympanic membrane temperature and specific region of face temperature. Quantitative InfraRed Thermography Journal, 16(1), 1–7. https://doi.org/10.1080/17686733.2018.1497877

[16] Werner, J. (2014). Measurement of Temperatures of the Human Body. Comprehensive Biomedical Physics, 5, 107–126. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53632-7.00515-3

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 22, pp. 275 – 288
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Red Neuronal Artificial Basada en Mapas Auto-organizados para el Posicionamiento de Robots

Paula Rosalía Flores Arce[1], Erick Rodríguez Hernández[2], Carlos Ríos Ramírez[1], Yesenia Eleonor González Navarro[1]

[1]Instituto Politécnico Nacional - UPIITA
[2]Instituto Politécnico Nacional – CIDETEC
ygonzalezn@ipn.mx

Resumen

En este trabajo se propone la implementación de un algoritmo de optimización de enjambre basado en los algoritmos de mapas auto-organizados (self organizing maps, SOM) para el posicionamiento de robots móviles con el fin de representar figuras en 2D. Introduciendo una figura geométrica al sistema para su preprocesamiento se obtiene el borde de la figura geométrica con el cual se entrena a la red neuronal que genera las posiciones finales de las neuronas, las cuales se envian al robot líder y este proporciona las órdenes sobre su desplazamiento y el de los robots seguidores, para que mediante sus posiciones finales formen la figura introducida. El robot líder obtiene información de su entorno y las posiciones de los robots seguidores por medio de un sensor LIDAR. Los robots seguidores sólo pueden recibir información del robot líder para ejecutar instrucciones sobre la trayectoria a seguir.

Palabras clave. Mapas auto-organizados, SOM, PSO, redes neuronales artificiales, robot móvil, LIDAR, robótica de enjambre.

1. Introducción

El campo de la robótica de enjambre ha crecido dramáticamente, involucrando un gran número de áreas de aplicación, tales como la exploración espacial y marina, ambientes peligrosos, el área del entretenimiento, etc.; estas áreas se benefician del uso de los sistemas multi-robot [1].

El enfoque de la robótica de enjambre es construir robots que pueden ser simples en su programación, en su estructura y que quizá no logren contener un atisbo de inteligencia como individuos, sin embargo, cuando se unen, cuando se convierten en un enjambre, pueden exhibir comportamientos cuyo análogo es el comportamiento que exhiben animales como los pájaros, los peces, e insectos sociales como las abejas, etc. para que en conjunto logren completar tareas que como individuos no es fácil lograr.

Hay demasiadas cosas que deben ser consideradas cuando de la robótica de enjambre se trata, tales como los robots que se utilizarán si el proyecto no lidia en puras simulaciones, las características físicas y electrónicas que se necesitan de estos robots, como el tamaño de los robots, si son aéreos terrestres o acuáticos, e incluso como se van a desplazar en su área. Como si estas necesidades no fueran ya suficientes, también entra en consideración los algoritmos que se deben usar para que el enjambre pueda ser considerado un enjambre, i.e. que tenga algún comportamiento que pueda llamarse colectivo, tales como formación de patrones, exploración y transporte en colectivo, etc. [2]. Aunado a esto, también está el problema de comunicación entre robots y cuánta percepción tendrán estos robots de su entorno. La robótica de enjambre puede ayudar en este aspecto haciendo la robótica más costeable.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 22, pp. 275 – 288
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Es enteramente posible que la investigación de robótica de enjambre, a pequeña o a gran escala, sea tan importante como lo es la robótica para la emulación de organismos complejos desarrollando tareas simples como lo es la emulación del balance al caminar de un ser humano en lo cual se han gastado millones en investigación. Esta investigación de lo complejo tiene aplicaciones, pero aún no es accesible al público en general, a diferencia de la robótica de enjambre, algo que queda claro en el gran número de arquitecturas y plataformas de simulación para enjambres de robots que existen, así como los algoritmos que se han estudiado, optimizado e implementado para la robótica de enjambre y los sistemas multi-robot.

En cuanto a los algoritmos se han tomado enfoques que van desde algoritmos probabilísticos, redes neuronales artificiales, hasta algoritmos bio-inspirados, tales como la optimización por enjambre de partículas, la optimización por colonia de hormigas, el algoritmo de luciérnagas (firefly algorithm) [2]. En general, el común denominador entre estos algoritmos es que tienen diversas formas de implementarse y de solucionar los problemas, por lo que la elección del algoritmo depende del problema en el que se va a implementar.

En este trabajo, se resolvió un problema de formación de patrones para robótica de enjambre con la implementación de un algoritmo de optimización de enjambre basado en los algoritmos de mapas auto-organizados (self organizing maps, SOM) en un grupo de 3 robots terrestres omnidireccionales, los cuales se comunican con un robot central el cual cuenta con un sensor LIDAR para su propio posicionamiento y el de los robots seguidores.

2. Trabajos Relacionados

2.1 Arquitecturas de robots.

Actualmente, en el mercado y en la investigación existe una gran variedad de arquitecturas de robots para la robótica de enjambre. Para este trabajo, las arquitecturas investigadas fueron de robots móviles del tipo con llantas, Mobile Wheeled Robots, MWR, como se muestran en la figura 1.

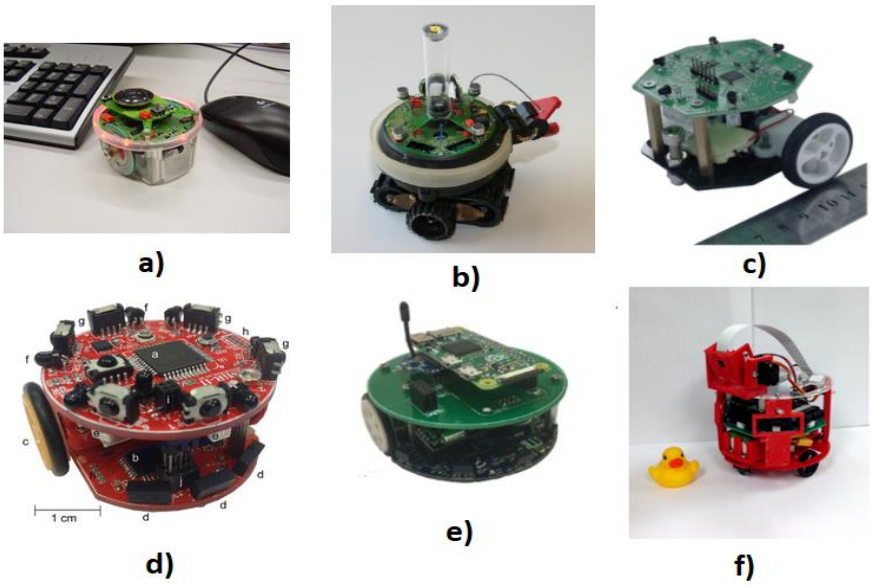


Figura 1 a) e-puck obtenido de [3], b) Swarm-bot, obtenido de [4], c) AMiR, Autonomous Miniature Robot obtenido de [5], d) Colias obtenido de [6], e) MONA, obtenido de [7], f) Pheeno, obtenido de [8].

La mayoría de los robots móviles que se muestran en la figura N°1, tienen sensores para obtener mediciones sobre su entorno, tales como sensores de proximidad infrarrojos, acelerómetros e incluso

cámaras; también cuentan con motores, ya sean motores a pasos, micromotores o motores de corriente directa; también cuentan con microcontroladores y baterías para la alimentación general del robot, lo que otorga a estos robots cierto nivel de autonomía y en estos enjambres de robot, típicamente se apunta que no haya un solo agente, robot, que controle todo el enjambre, i.e. descentralización.

El tamaño de la mayoría de los robots mostrados en la figura N° 1 se encuentra entre los 3 y 12 *cm* de anchura, y la mayoría fue construido para la investigación con precios que varían entre los 25 y los 900 euros.

2.2 Algoritmos.

La robótica de enjambre se define, según Erol Sahin [9], como el estudio de cómo se puede diseñar una gran cantidad de agentes físicamente encarnados relativamente simples de modo que un comportamiento colectivo deseado surja de las interacciones locales entre los agentes y, entre el agente y el medio ambiente.

Los estudios que intentan descubrir los principios detrás del surgimiento de la autoorganización en los sistemas biológicos a menudo desarrollan modelos que se construyen con interacciones simplificadas en el mundo y mecanismos de comportamiento abstractos en los individuos. Los modelos de autoorganización de insectos y animales sociales ya se han utilizado como fuentes de inspiración para muchos estudios de robótica de enjambre, mientras tanto, la elección de los algoritmos a implementar en un enjambre de robots depende del problema a resolver, ya sea formación de patrones o la exploración de un ambiente.

Estos algoritmos a implementar pueden tener todo tipo de enfoques, desde algoritmos bioinspirados [2], como es la implementación de un algoritmo inspirado en los murciélagos [2] para la formación del enjambre de robots, o la planeación de un camino por medio de un algoritmo bionspirado en las colonias de abejas [10], hasta enfoques probabilísticos, deterministas y estocásticos para todo tipo de tareas dentro de los límites de la robótica de enjambre.

Algunos de los algoritmos implementados en enjambres de robot, se han hecho en simulación, tales como el estudio que realizó Nouyan, S. con una plataforma de simulación para los s-bots [4,10]. Este es un estudio experimental sobre dos mecanismos de control que utilizan estructuras robóticas conectadas visualmente para formar un camino entre 2 localizaciones en un área cercada bajo la restricción de que las capacidades visuales de los robots no les permitían percibir los 2 lugares simultáneamente [11].

Entre un sinfín de ejemplos de implementación de algoritmos en enjambres de robot físicos se encuentran: Una ‘manada’ de robots que realiza la tarea de transportar un objeto realizando varias tareas de búsqueda, navegación, transporte, localización y ‘cosecha’ en un prototipo de robot que cuenta con un dispositivo ESP32 y varios sensores para el ambiente [12]. Un enfoque diferente es el de Vardy, A. que se enfoca en construir un laberinto para guiar a los robots en una tarea similar a la tarea de búsqueda, donde los robots tienen que llevar objetos a una zona designada; en este caso el algoritmo se basa en una máquina de estado finito que sigue el laberinto [13]. Y. Lei, et al, propusieron una arquitectura híbrida basada en las mejores propiedades de la lógica difusa y las redes neuronales, que hace que los robots traigan consigo el comportamiento necesario mediante el diseño del comportamiento básico de los robots y las reglas de control local para resolver tareas de formación, moverse hacia una meta, evitar obstáculos y otros robots [14].

En otras áreas se han implementado sistemas de enjambre con redes neuronales y con lógica difusa [14], pero la investigación de robótica de enjambre con mapas auto-organizados es limitada. De igual manera, se han implementado diversas formas de mantener la coherencia en el enjambre, pero en el área de las redes neuronales, los mapas auto-organizados están escasamente presentes en este ámbito.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 22, pp. 275 – 288
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

3. Desarrollo

En la figura 2, se presenta el panorama general del proyecto, desde el procesamiento que se lleva a cabo en un ordenador de placa reducida Raspberry Pi, la comunicación y el movimiento de los robots móviles que se llevan a cabo en una placa de desarrollo ESP32 y Arduino Pro mini, y finalmente el procesamiento post movimiento que nuevamente se lleva a cabo en el ordenador Raspberry Pi.

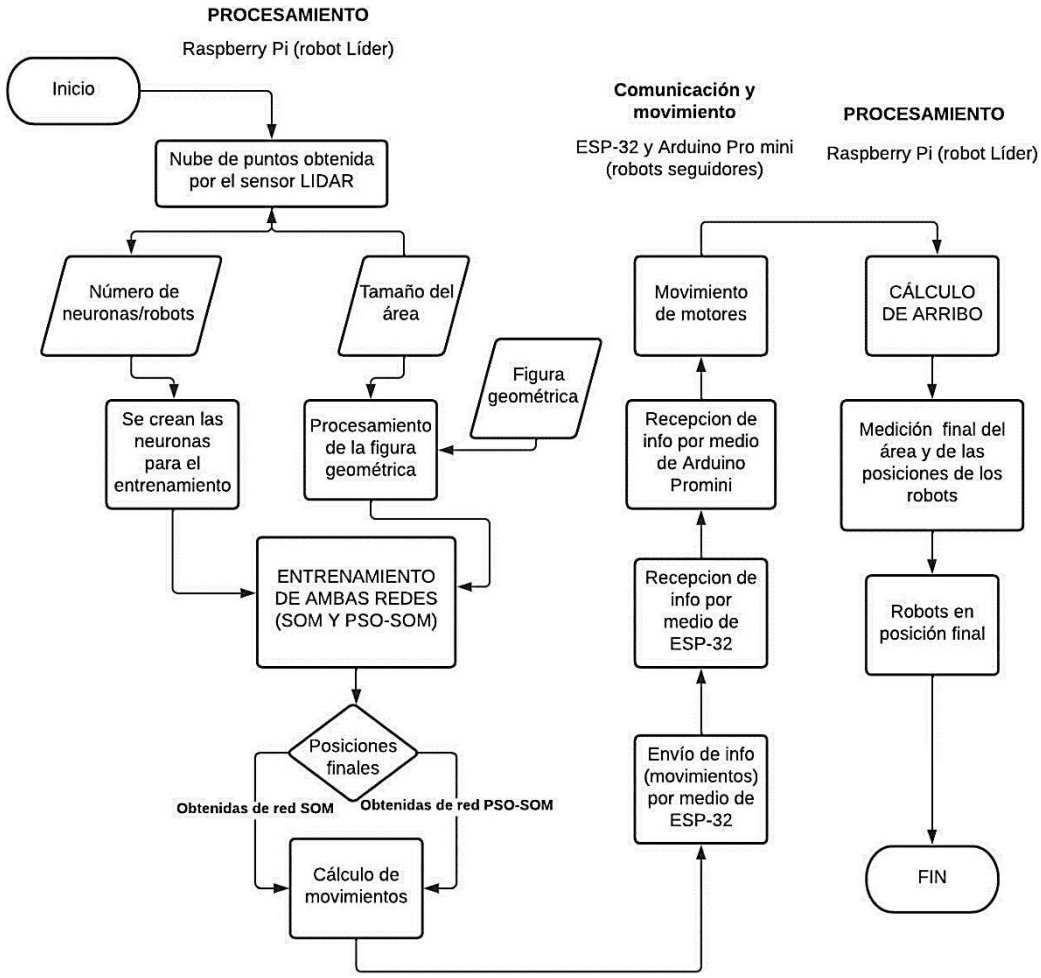


Figura 2. Diagrama del proyecto.

El procesamiento del algoritmo se implementa en el robot líder, el cual posee un ordenador de placa reducida, Raspberry Pi. Este procesamiento comienza con la obtención de la nube de puntos que representa el área por medio de un sensor LIDAR. De esta nube de puntos se obtiene el tamaño del área y las posiciones de todos los robots. Con el tamaño del área se escala la figura geométrica deseada para que se mantenga dentro del área de trabajo y con las posiciones de los robots se les dan valores iniciales a las neuronas de la red.

Del entrenamiento de la red se obtienen las posiciones finales de las neuronas las cuales se envían del robot líder a los robots seguidores por medio de una tarjeta ESP-32. El movimiento de los robots seguidores y del líder se ordena desde un Arduino Promini y puentes H que controlan por modulación por ancho de pulsos, PWM, motorreductores sobre cuyos ejes están montadas llantas omnidireccionales.

El robot líder decide cuando las posiciones finales han sido alcanzadas a través de la obtención de nuevas posiciones de los robots por medio del sensor LIDAR.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 22, pp. 275 – 288
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

3.1 Robots

Previo a la implementación y la obtención de resultados, se diseñaron los robots móviles basados en las necesidades de este proyecto.

Para la implementación se diseñaron 2 modelos de robots móviles con llantas omnidireccionales. El primer modelo es el del seguidor, el cual se muestra en la figura 3, y el segundo modelo es el del líder que se muestra en la figura 4.

En ambos modelos, la base y el primer nivel son iguales, solo que el modelo del seguidor solo cuenta con los dos niveles que se muestran en la figura N° 3. La movilidad del robot está dada por 4 motorreductores, figura N° 3.f), sobre cuyos ejes están montadas llantas omnidireccionales, figura N° 3.a). Para el control de los motorreductores se tienen 2 puentes H modelo L298N, figura N° 3.c). Para la alimentación de los puentes H se tienen 2 baterías recargables Li-ion 2200 mAh tipo 18650, figura N° 3.e).

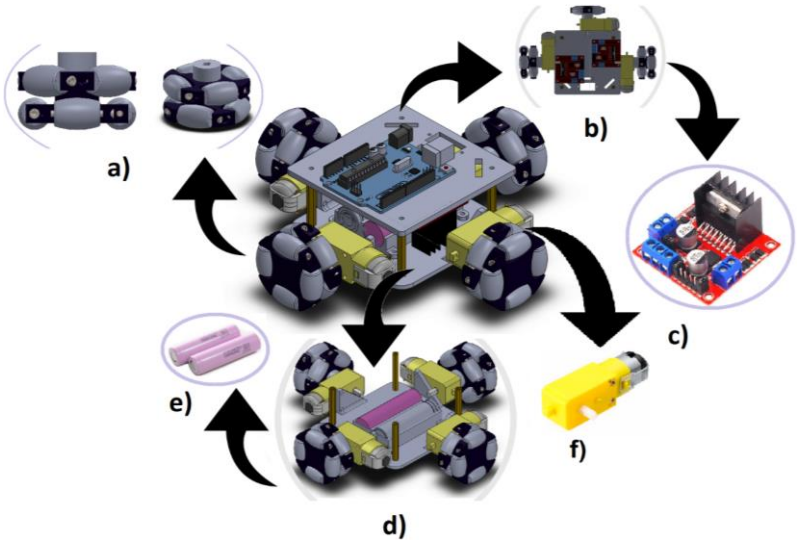


Figura 3. El robot seguidor, a) llantas omnidireccionales, b) vista inferior de la tapa del seguidor, c) drivers de los motores, l298n. c) la base de los robots, e) pilas de Li-ion 2200 mAh tipo 18650, f) motoreductores de corriente directa.

El líder se distingue de los seguidores por tener un sensor LIDAR, figura 4a) en un tercer nivel, así como un ordenador de placa reducida Raspberry Pi en un segundo nivel, como se muestra en la figura 4b).

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 22, pp. 275 – 288
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

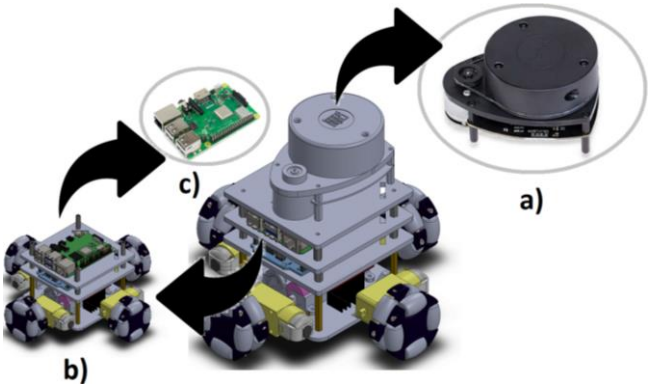


Figura 4. Partes del líder a) sensor LIDAR, b) el líder sin el LIDAR, c) Raspberry Pi 3B+, el cerebro del líder.

Tanto los robots seguidores como el robot líder tienen un Arduino pro-mini para el control de los puentes H, tienen una tarjeta ESP-32 para la comunicación con el líder o, en el caso del líder, con los seguidores.

3.2 ALGORITMOS

Para este proyecto se decidió tener un sistema centralizado, donde el robot líder dicta los movimientos de los robots seguidores obteniendo la información de sus posiciones por medio del sensor LIDAR, por lo que el procesamiento y la obtención de los movimientos se llevan a cabo en el robot líder, específicamente en un ordenador de placa reducida, Raspberry pi 3B+. Se empleo el lenguaje de programación Python en el cual se desarrollaron 2 algoritmos: el primero basado únicamente en SOM y el segundo utilizando PSO-SOM.

Como se mencionó en el diagrama de la figura 2, la parte del procesamiento en el líder comienza con la introducción de una figura geométrica al sistema.

La figura geométrica en 2D se introduce como una imagen que puede ser de diferentes tamaños y puede ser en blanco y negro o a color. En la parte de procesamiento, la imagen se convierte a escala de grises si está a color y posteriormente es convertida a imagen en blanco y negro. Una vez que se obtuvo la imagen a blanco y negro, se obtiene el contorno de la figura con una función de la librería de Skimage de Python, la cual obtiene los contornos de una imagen introducida y regresa las coordenadas de todos los puntos que conforman el contorno. Estas coordenadas son los patrones de entrada que se introducen al entrenamiento del SOM, que es entrenamiento competitivo el ganador se lleva todo o WTA o del PSO-SOM después de que se ajusta al tamaño del área de trabajo.

En la figura 5 se muestra la tarea de procesamiento y entrenamiento que se lleva a cabo en el ordenador del robot líder, que incluye el procesamiento de la nube de puntos obtenida del sensor LIDAR, el procesamiento de la imagen y la obtención de los movimientos que deberán llevar a cabo los robots seguidores como adelante F, atrás B, izquierda L y derecha R.

Después de ser introducida la figura que se quiere representar, el sensor LIDAR obtiene una nube de puntos del área en coordenadas polares, ángulo y distancia. En Python se realizó un programa para reconocer las esquinas basándose únicamente en las coordenadas polares que se obtienen con el LIDAR. Una vez obtenidas las esquinas, se calcula la longitud de las líneas que unen a estos puntos para conocer la longitud de las paredes que cercan el área y así obtener el tamaño del área de trabajo, para que sea incorporado al algoritmo. Las unidades de los puntos que se obtienen del LIDAR se encuentran en mm por lo que las longitudes se encuentran en mm también.

Una vez que ya se obtuvieron el patrón de entrada para la red neuronal RN, y las posiciones iniciales de los robots dentro del área, se procede al entrenamiento de la red, como se muestra en la figura 5.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 22, pp. 275 – 288
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

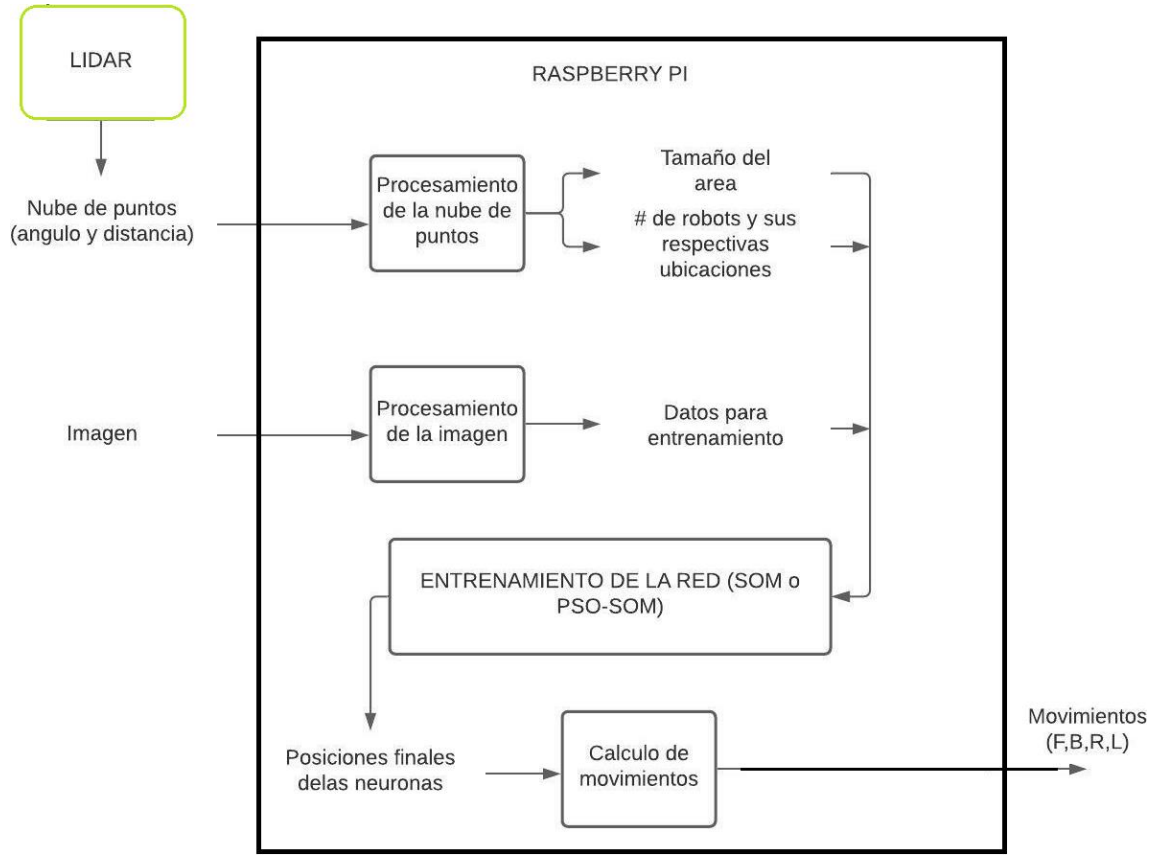


Figura 5. Diagrama del procesamiento llevado a cabo en el ordenador Raspberry Pi.

Tomando como referencia el pseudocódigo que se muestra en la figura 6 y el pseudocódigo de enjambre de partículas, desarrollado por M. O'Neill y A. Brabazon [15], mostrado en la figura 6, se realizó la implementación con los robots de acuerdo con los resultados que se obtenían del entrenamiento de las redes.

```
Se inicializan los pesos de las n neuronas, puede ser aleatoriamente
   for t = 1 hasta # total de épocas
      for i = 1 hasta # total de muestras para el entrenamiento
      en este ciclo de i se van a tomar c/u de las muestras para el
      siguiente ciclo
            for j = 1 hasta # total de neuronas
                  en este ciclo se toman c/u de las neuronas y se
                  obtiene la distancia euclidiana de c/ upara determinar
                  que neurona está más cercana a la muestra dada.
            end
            Este ciclo aplica el WTA para obtener la neurona ganadora.
            Una vez obtenida la ganadora, se actualizan los pesos de
            esa neurona y los de sus vecinos.
      end
end
```

Figura 6. Pseudocódigo de una red tipo SOM, basado en [37] con algunas modificaciones hechas con base a algoritmos del SOM realizados y aplicados para este proyecto.

```
Se inicializa el enjambre de dimensión D con su respectiva velocidad y
posición para cada partícula.
   for t = 1 hasta # total de iteraciones
      for i = 1 hasta # total de partículas
            se aplica la ecuación de actualización de velocidad de las
            partículas se aplica la ecuación de actualización de la
            posición de las partículas
      end
se calcula y define si la posición actualizada es el óptimo global.
Si la posición cumple con los requerimientos del problema, se acaba el
ciclo.
end
```

Figura 7. Pseudocódigo para el algoritmo PSO, basado en [19] con algunas modificaciones basadas en códigos del PSO realizados en este proyecto.

Una vez que se obtuvieron las posiciones finales de las neuronas en el entrenamiento, se obtienen los movimientos que deben hacer los robots, los cuales van a estar dados como simples órdenes F, B, R y L.

Estas órdenes se envían a los robots seguidores por medio de la tarjeta ESP32 la cual se comunica con otras tarjetas ESP32 por medio de un protocolo de comunicación llamado ESP-NOW [16] el cual fue desarrollado por Espressif, específicamente para la comunicación entre los módulos ESP. Este protocolo de comunicación es similar a la conectividad inalámbrica de 2.4GHz que se usa en un mouse inalámbrico y se puede usar entre varios módulos de tal manera que pueden conectarse como un emisor para un receptor, un emisor con varios receptores, un receptor para varios emisores e incluso crear una red donde todos son emisores y a la vez, todos son receptores. Este tipo de comunicación no envía señales analógicas si no digitales, las cuales se envían como caracteres, estructuras, etc.

De la tarjeta ESP32 se envían las órdenes por comunicación UART, un protocolo de comunicación simple de dos cables para intercambiar datos en serie [17], al Arduino Mini el cual controla los actuadores del robot por medio del puente H y PWM, como se muestra en la figura 8.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 22, pp. 275 – 288
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

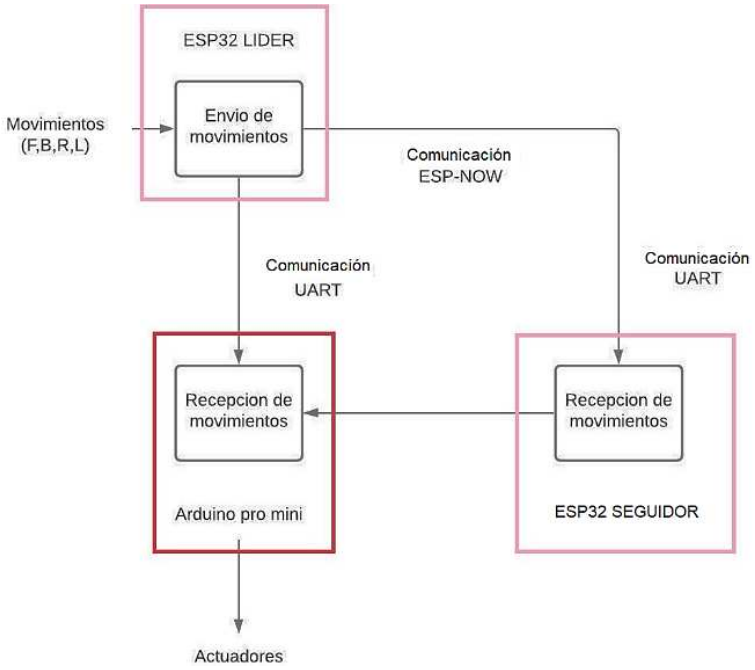


Figura 8 Comunicación entre los robots líder y seguidor por medio del protocolo ESP-NOW, rosa; comunicación entre ESP32 y Arduino Pro mini para el manejo de actuadores, rojo.

4. Implementación y Resultados

Para comprobar que el algoritmo es capaz de posicionar a los robots de acuerdo con la figura introducida se implementó el sistema en un área de aproximadamente 1.5x1.5 m con 3 robots: el robot líder y 2 robots seguidores, que representan 3 neuronas en el SOM y 3 partículas en el PSO-SOM.

A continuación, se muestran algunos resultados de múltiples experimentos implementando el algoritmo con algunas de las figuras geométricas mostradas en la figura 9.

a) b) c)

Figura 9. Algunas de las figuras geométricas utilizadas para evaluar el algoritmo.

Para el primer experimento mostrado se tomó la figura 9a), un cuadrado. Como condiciones iniciales, los robots están posicionados en el área de trabajo como se muestra en la figura 10a). Una vez que se tiene el área y la posición inicial de los robots, se sobrepone el borde de la figura geométrica elegida, como se observa en la figura 10b) en los puntos morados.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 22, pp. 275 – 288
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

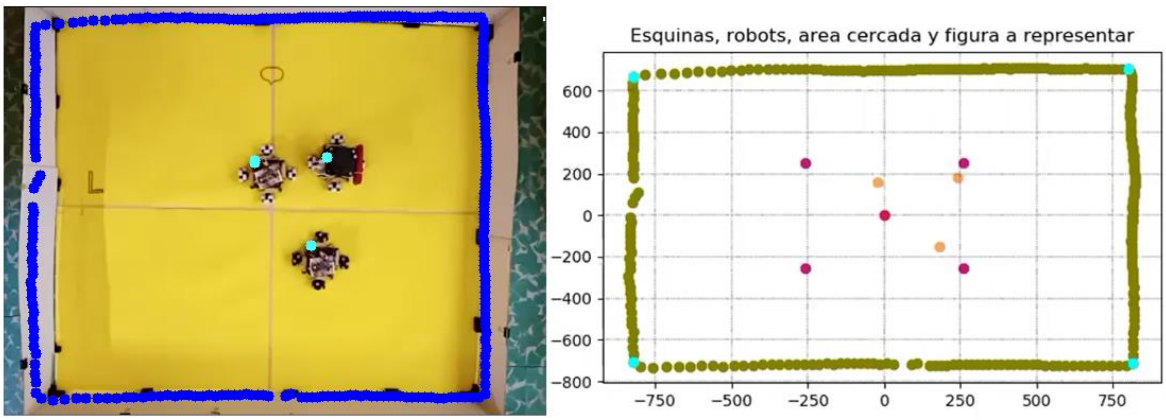


Figura 10. Condiciones iniciales del experimento.

En la figura 10b), hacia adelante para los robots es hacia la elipse en la parte superior del área y hacia la izquierda es hacia la L en la parte izquierda del área. El área cercada está superpuesta en color azul sobre una imagen del área y similarmente las posiciones de los robots están superpuestas en color cian sobre los mismos.

En la figura 10b) se muestra el área cercada en color verde olivo, en color cian se muestran las esquinas de la misma, en color morado se muestra la figura a representar y en café claro se muestran las posiciones de los robots.

Una vez que ya se realizó el escaneo del área y se ubicó la imagen dentro de la misma, se procede al entrenamiento de las redes SOM y PSO-SOM.

En este experimento se eligió la red PSO-SOM. Las posiciones finales de los robots después de los movimientos se muestran en la figura N° 11. En la figura 11b) se muestra el área de trabajo con los robots marcados dentro de la misma.

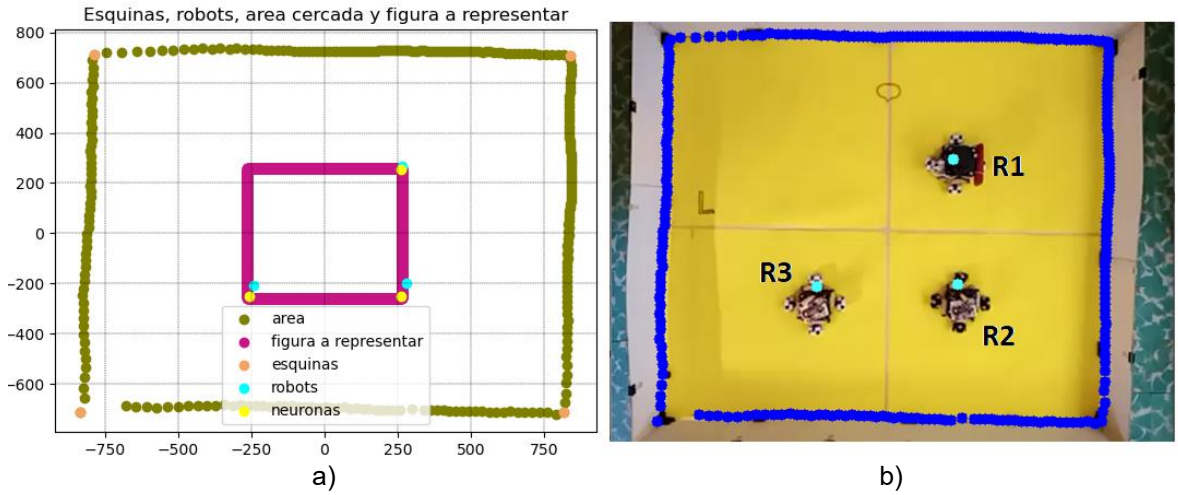
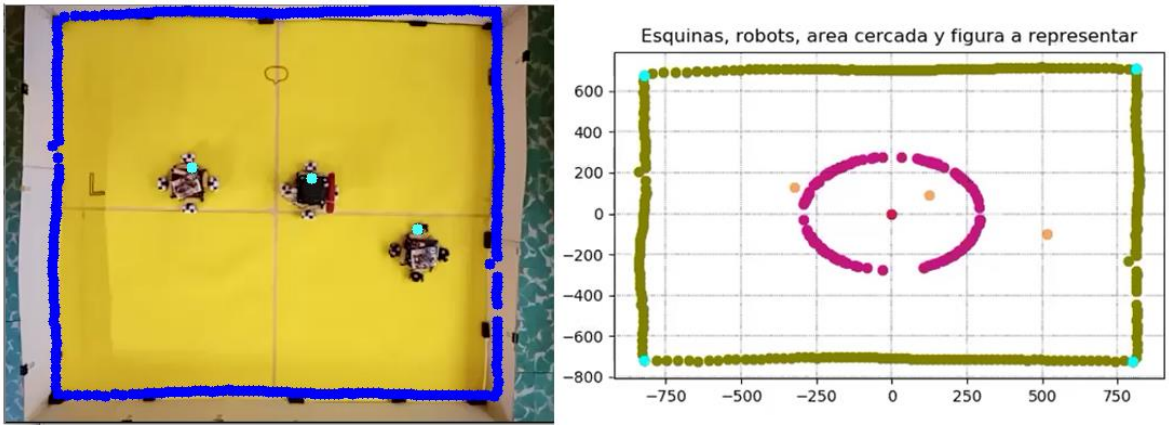


Figura 11 Posiciones finales de los robots al terminar el experimento

Con estas posiciones finales, se obtienen las diferencias que se muestran en la tabla 1, en el experimento 4.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 22, pp. 275 – 288
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

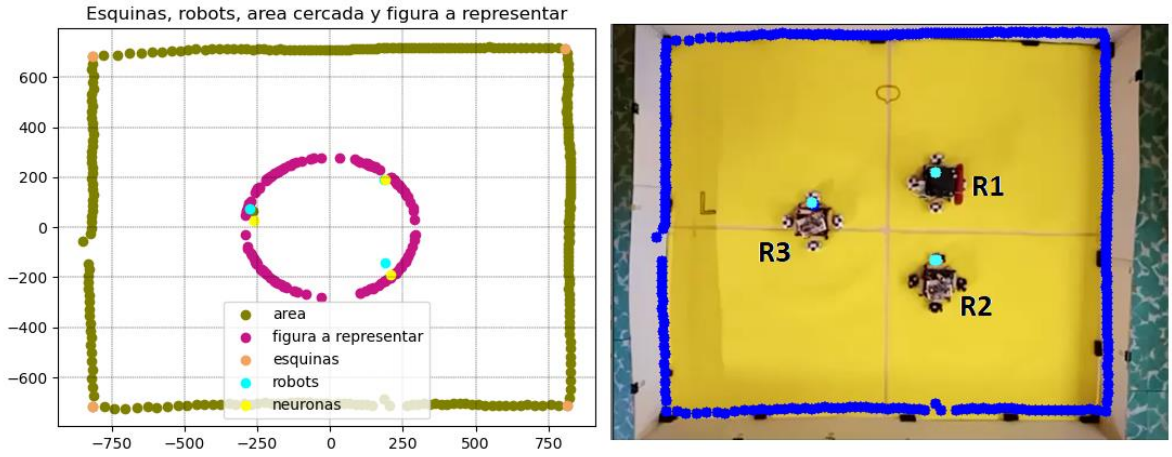
En un experimento posterior se utilizó el círculo de la figura 9b). Como condiciones iniciales, los robots están posicionados en el área de trabajo como se muestra en la figura 12a).



a) b)

Figura 12. Condiciones iniciales del experimento.

Después del entrenamiento se escogió SOM para el posicionamiento de los robots. Las posiciones finales de los robots después de los movimientos se muestran en la figura 13. En la figura 13b) se muestra el área de trabajo con los robots marcados en cyan dentro de la misma.



a) b)

Figura 13 Posiciones finales de los robots al terminar el experimento.

Con estas posiciones finales, se obtienen las diferencias que se muestran en la tabla 1, en el experimento 2.

En la tabla 1, se muestran los dos experimentos anteriores y algunos más que se realizaron con algunas otras imágenes, en la cual se pueden ver los porcentajes de error que se obtuvieron al momento de la implementación.

Estos valores de error pueden explicarse con ayuda de las diferencias obtenidas para cada robot con su punto final: para el movimiento de los robots, el algoritmo toma las distancias en *x* y *y* del mismo y lo compara con la posición a la cual debe dirigirse. Sin embargo, si la distancia de separación entre estos dos puntos en *x* y *y* es menor al avance de los robots con cada movimiento, el robot ya no se

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 22, pp. 275 – 288
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

mueve. Este avance se dejó en $48\ mm$ por movimiento, adelante, atrás, derecha o izquierda, todos los robots tienen el mismo avance.

Tabla 1. Diferencia de distancia entre la medición obtenida con el LIDAR de la posición y el punto final del entrenamiento de la respectiva red.

# de experimento	Figura a representar		Diferencia de distancia con el punto final (*mm*)			Red utilizada	Estatus
			R1	R2	R3		
1		X	0.1466	49.483	44.4839	SOM	Exitoso
		Y	37.4651	0.9922	5.8127		
2		X	2.5588	17.9523	12.3227	SOM	Exitoso
		Y	2.3481	46.19.33	47.8802		
3		X	24.6870	4.4382	33.0263	PSO-SOM	Exitoso
		Y	19.0930	0.9014	33.8320		
4		X	4.5746	17.8101	15.3445	PSO-SOM	Exitoso
		Y	13.2143	52.9269	44.2130		
5		X	13.4857	37.4892	12.6924	PSO-SOM	Exitoso
		Y	34.5735	1.8343	61.7776		
6		X	23.3716	22.2268	27.9637	SOM	Exitoso
		Y	3.0563	1.9338	1.1443		

Observando las diferencias que se reportaron en cada experimento, se tiene que, si bien la mayoría no rebasa de $48\ mm$, hay algunas que sí son bastante elevadas, lo que puede deberse a las condiciones en las que se llevaron a cabo los experimentos.

5. Conclusiones y Trabajo a Futuro

Relevante a la hipótesis del proyecto, los mapas auto-organizados y su modificación con el PSO, probaron ser efectivos para el posicionamiento de los robots, sobre todo cuando se trata de figuras geométricas ligeramente complejas. En general, con pocas neuronas, tanto el SOM como el SOM-PSO se dispersan de manera aceptable para representar la figura, pero como estos algoritmos se consideran heurísticos, i.e. que tienen elementos de aleatoriedad, no dan los mismos resultados, aunque se ejecuten en las mismas condiciones por lo que en ocasiones la representación no es aceptable y en otras ocasiones sí lo es.

En la implementación con robots, el área de trabajo se encuentra en espacios delimitados, por lo que el tamaño del área no es el más aceptable para la implementación de más robots por lo que para

poder notar la forma en este experimento, se necesitó de los puntos de la figura sobrepuestos en los robots. Con mayor área y más robots una figura más compleja puede ser vista a simple vista.

El sistema que tiene el LIDAR para la comunicación serial requiere que se limpie el buffer serial cada vez que se requiere hacer una nueva medición; esto toma tiempo. Si se pudiera implementar la comunicación serial en Python con el LIDAR de tal manera que pudieran leerse los datos de manera continua, se reduciría el tiempo de espera entre lecturas lo cual permitiría el movimiento constante de los robots y poder aplicarlo a otros objetivos de robótica de enjambre.

Los robots tienen una forma de comunicación que solo permite hasta 20 unidades, o 10 dependiendo de la encriptación. Sin embargo, la tarjeta ESP32 en teoría permite realizar conexiones a manera de crear una red donde, si el líder no puede comunicarse con cierto seguidor, otros seguidores pudieran hacerlo por él. Contando otras formas de comunicación entre robots, y sin contar radiofrecuencia y el Bluetooth, el protocolo utilizado en este proyecto es rápido y relativamente sencillo de usar.

La robótica de enjambre fue notoriamente conveniente para este proyecto, ya que cuando se experimentaban errores con algún robot, de comunicación con el robot líder o se tenían que cargar las baterías, se podía proseguir con los experimentos, lo que ahorró tiempo, sin mencionar que los materiales con que se construyeron los robots son accesibles.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP) del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo a este trabajo a través del proyecto SIP20220835.

Referencias

[1] Iglesias, A., Gálvez, A., Suárez, P. “Swarm robotics – a case study: bat robotics”, Nature-Inspired Computation and Swarm Intelligence, Academic Press, pp. 273-302, United Kingdom, 2020.
[2] Beni, G. “From Swarm Intelligence to Swarm Robotics”, Swarm Robotics. Lecture Notes in Computer Science, Springer, vol 3342, Berlin, Heidelberg, 2005.
[3] F. Mondada, et al. “The e-puck, a Robot Designed for Education in Engineering,” Proceedings of the 9th Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, vol. 1, 2009.
[4] Dorigo, M. et al. “The SWARM-BOTS Project”, Swarm Robotics. Lecture Notes in Computer Science, Springer, vol. 3342, Berlin, Heidelberg, 2005.
[5] Farshad, A., Khairulmizam, S, Ramli, A. R. "Development of a Miniature Robot for Swarm Robotic Application", International Journal of Computer and Electrical Engineering, vol. 1, no. 4, pp. 436, 2009.
[6] Arvin, F., Murray, J., Zhang, C., Yue, S. “Colias: An Autonomous Micro Robot for Swarm Robotic Applications,” International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 11, no. 7, 2014
[7] Arvin, F., Espinosa, J., Bird, B. et al. “Mona: an Affordable Open-Source Mobile Robot for Education and Research”, Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol. 94, pp. 761–775, 2019.
[8] Wilson, S., et al., "Pheeno, A Versatile Swarm Robotic Research and Education Platform", IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 1, no. 2, pp. 884-891, 2016
[9] Sahin, E. “Swarm Robotics: From Sources of Inspiration to Domains of Application”, Lecture Notes in Computer Science, Springer, vol 3342, Berlin, Heidelberg, 2005.
[10] Manish, Kumar, S. “Robot Motion Path Planning Using Artificial Bee Colony Algorithm”, International Conference on Frontiers of Intelligent Computing: Theory and Applications, Springer, vol. 327, Singapore, 2023.
[11] Nouyan, S., Campo, A., Dorigo, M. “Path formation in a robot swarm”, Swarm intelligence, vol. 2, pp. 1-23, 2007.

[12] Ordaz-Rivas, E., Rodriguez-Liñan, A., Torres-Treviño, L. “Autonomous foraging with a pack of robots based on repulsion, attraction and influence”, Autonomous Robots, vol. 45, pp. 919–935, 2021.
[13] Vardy, A. “The swarm within the labyrinth: planar construction by a robot swarm”, Artificial Life and Robotics, vol. 28, pp. 117–126, 2023.
[14] Lei, Y., Zhu, Q., Leng, X., Feng, Z., Song, J. “The Application of Fuzzy Neural Networks in Formation Control for Multi-Robot System”, IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application, pp. 69-73, Wuhan, China, 2008.
[15] O’Neill, M., Brabazon, A. “Self-organising swam (SOSwarm)”, Soft Computing, vol12, pp. 1073–1080, 2008.
[16] Espressif. “espressif/esp-now: A connectionless Wi-Fi communication protocol”, Espressif Systems, Shanghai, 2023.
[17] Jan Mallari. “How to Set Up UART Communication on the Arduino”, Circuit Basics, Arduino.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 23, pp. 289 – 301
ISBN: 978-607-9394-27-, 2023

Propuesta de metodología para la programación de un vehículo aéreo no tripulado

Ramos Juárez Enrique Iván, Juan Manuel Ramos Arreguín✉, Pedraza Ortega Jesús Carlos, Aceves Fernández Marco Antonio, Avendaño Juárez José Luis, Gorrostieta Hurtado Efrén

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería
✉juan.ramos@uaq.edu.mx

Resumen

El uso de los drones se ha extendido bastante hoy en día. Desde aplicaciones de entretenimiento, vigilancia, reconocimiento remoto, y muchas otras aplicaciones. En este trabajo se presenta una propuesta de metodología para implementar un algoritmo de seguimiento de ruta para un drone marca Tello. Para esto, se usa el lenguaje Python y la librería djitellopy, la cual permite establecer una comunicación por WiFi con el drone. De esta manera, se puede obtener imágenes de la cámara del drone, y procesarla en la computadora para identificar la ruta a seguir. La librería permite el envío de comandos, para que el drone realice diversos movimientos como subir, bajar, girar a la derecha, izquierda, suspenderse en el aire y aterrizar, entre otros movimientos. Se logró el reconocimiento de la ruta, a diferentes velocidades. Este trabajo marca la pauta para que otros estudiantes puedan continuar con este trabajo y así lograr mejorar los resultados.

Palabras clave: Drone, Python, procesamiento de imágenes, reconocimiento, ruta.

1. Introducción

El uso de drones está cobrando cada vez una mayor importancia en el mundo actual. Los podemos usar con fines recreativos, de vigilancia, como mensajería, y una gran variedad de aplicaciones. Por todos esto, la tecnología de los drones se considera como parte del desarrollo de tecnología actual, especialmente a partir del año 2017 [1]. Siendo uno de los aspectos que se deben trabajar en ese tipo de sistemas, es la autonomía de vuelo. En este sentido, se han desarrollado diversos trabajos enfocados en el control de vuelo de los drones, siendo algunos de estos trabajos los siguientes.

En 2018, Anton presenta un trabajo donde un drone sigue el sendero de un bosque, y aplica aprendizaje profundo o redes neuronales convolucionales [2]. También los drones pueden ser usados en mensajería, para la entrega de mercancías. Miranda presenta un sistema de navegación que permite la entrega de mercancía con drones autónomos, generando un punto inicial y un punto final, con la ayuda de un sistema GPS, barómetro y otros [3]. El aterrizaje se basa en la detección de un marcador usando una cámara, y el método se basa en campos vectoriales para seguir la ruta [3].

En el 2016, Vergouw [4] menciona la diferencia entre drones de acuerdo a la aplicación, incluyendo el uso de sensores y de comunicación inalámbrica. Así mismo, realizan un análisis de los aspectos legales respecto al espectro de frecuencias y equipos electrónicos, así como el alcance y autonomía de los drones.

Los drones se presentan como una de las 11 tecnologías de mayor relevancia en la década, debido a su crecimiento en aplicaciones de entretenimiento, industrial y en muchas ocasiones, de rescate [5].

La programación de drones está teniendo una gran importancia, especialmente para poder desarrollar y probar diversos algoritmos enfocados al vuelo autónomo de drones. Guillen [5] menciona la manera de trabajar con OpenCV para Python, C++ y Java, mostrando aplicaciones de procesamiento de imágenes médicas, vigilancia, detección de objetos, entre otros [6] [7]. Los drones Tello pueden ser programados con el uso de simulador, visualizador y calculador de precisión, lo cual es una base importante para el desarrollo de la programación de este modelo de drones [8].

En este trabajo se presenta una propuesta de metodología para el trabajo y programación de un drone marca Tello, enfocado hacia la autonomía de vuelo. Como caso de estudio, se programa al drone para que siga una línea negra dibujada en el piso, de manera autónoma.

2. Tecnología de los drones

2.1 Definición de drone

Los sistemas Aéreos No Tripulados (UAS, Unmanned Aircraft Sytems) tienen la capacidad de volar sin tripulación a bordo y de manera autónoma para una función concreta. Un UAS se considera sinónimo parcial de drone ya que cuando a un sistema aéreo no tripulado se le añade una cámara que sirva para monitorear o vigilar se convierte en uno. Debido a la precisión de los sistemas de navegación en la actualidad, es posible para los drones repetir vuelos de modo sistemático y de esta manera comparar las imágenes de distintos momentos utilizando herramientas de software específicas. El principal uso de los drones es la adquisición de datos, para lo que se agregan sensores como cámaras fotográficas o de video (en espectro visible, térmico o multiespectral dependiendo del uso), sensores meteorológicos o cualquier otro sensor que se utilice para la toma de muestras o recaudación de información. El manejo o funcionamiento de los distintos sensores se pueden controlar desde una estación de control remoto donde además se reciben los datos que el drone va adquiriendo durante el vuelo [9].

2.2 Funcionamiento del drone

Un drone es capaz de moverse con cuatro grados de libertad. Es decir, puede trasladarse en tres direcciones y rotar en una, para poder mantener un momento angular cero que permite al drone permanecer en un lugar fijo en lugar de rotar en una dirección. Esto es posible dado que dos de los motores de un drone giran en sentido de las manecillas del reloj y los otros dos motores giran en sentido contrario, tal y como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Giro de los motores para mantener un momento angular cero.

Si movemos los cuatro motores de un drone a la misma velocidad generando una fuerza que supere el peso del drone se provoca que el drone se mueva hacia arriba (movimiento de traslación). Para bajar al drone se tiene que disminuir la velocidad de todos los motores para que la elevación sea menor que el peso del drone. Por otro lado, para que el drone flote en el aire se tiene que cambiar la velocidad de los motores para que su elevación sea igual al peso del drone por lo que permitirá que flote sobre el suelo.

El segundo tipo de traslación es desplazar el drone hacia la derecha o hacia la izquierda. Para el movimiento a la derecha, se disminuye la velocidad de los motores derechos y se aumenta en los motores izquierdos, como se muestra en la figura 2.

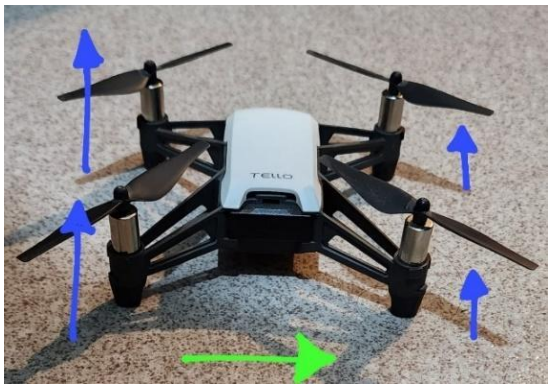


Figura 2. Diferencia de velocidad entre los motores para desplazar el drone hacía la derecha.

Por otro lado, si queremos mover el drone hacia la izquierda se reduce la velocidad de los motores de la izquierda y se aumenta la velocidad de los motores de la derecha, como se muestra en la figura 3.

Figura 3. Diferencia de velocidad entre los motores para desplazar el drone hacía la izquierda.

En la tercera traslación el drone se puede desplazar hacia delante y hacia atrás. Se realiza una secuencia similar a la del desplazamiento de derecha y de izquierda, pero con los motores delanteros y traseros del drone, como se muestra en la figura 4 y en la figura 5.

Para rotar el drone en sentido de las manecillas del reloj se reduce la velocidad de los motores que se mueven en el sentido de las manecillas del reloj y aumentar la velocidad de los motores que se están moviendo en sentido contrario de las manecillas del reloj, como se ve en la figura 6. Para el movimiento en sentido antihorario se reduce la velocidad de los motores que giran en sentido contrario de las manecillas del reloj y se aumenta la velocidad de los motores que giran en sentido de las manecillas del reloj, como se muestra en la figura 7.

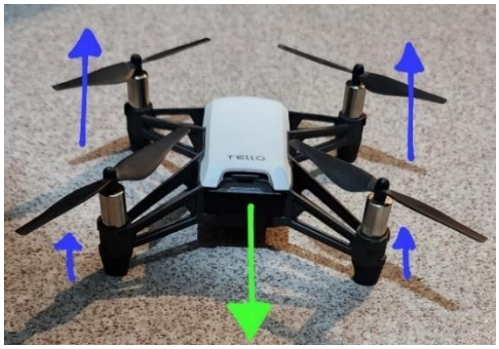


Figura 4. Diferencia de velocidad entre los motores para desplazar el drone hacía delante.

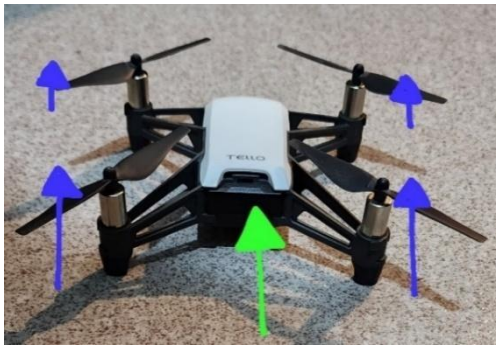


Figura 5. Diferencia de velocidad entre los motores para desplazar el drone hacía atrás.

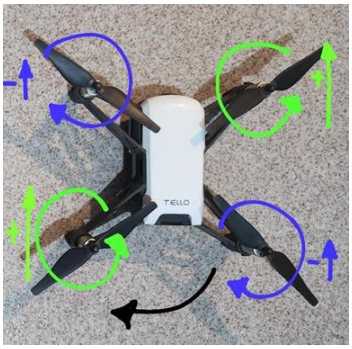


Figura 6. Giro del drone en sentido horario.

Figura 7. Giro del drone en sentido antihorario.

En la actualidad, los sistemas aéreos no tripulados más usados son pequeños drones equipados con cámaras fotográficas en espectro visible o térmico, de una masa máxima al despegue de 2-25 kg aproximadamente, con una autonomía de vuelo de 30 minutos a 4 horas y con alcances inferiores a 30 km por lo general [9].

2.3 Normas para el vuelo de drones.

Para trabajar con drones, es necesario tomar en cuenta la legislación vigente en México, la cuál se conoce como Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, que establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano [10]. La finalidad es informar a los usuarios de drones, sobre el procedimiento que se debe realizar para registrar por Internet un RPAS ante la Agencia Federal de Aviación Civil (AFAC) mediante su página electrónica.

3. Metodología

En el desarrollo de este trabajo se usa un drone Tello, y para la programación del drone se propone la metodología de la figura 8.

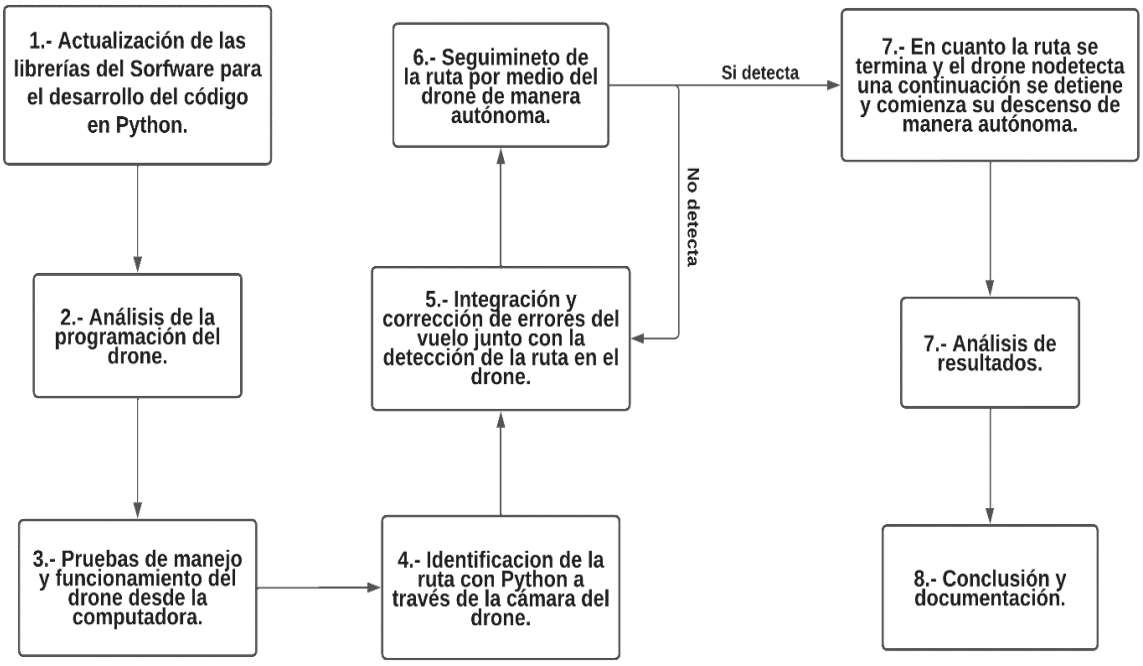


Figura 8. Metodología para programar el drone Tello.

3.1 Actualización del software.

Es necesario actualizar y tener las librerías necesarias para el manejo del drone a través de la computadora y de esta manera tener un control específico y fácil donde podamos programar los movimientos y lo necesario para que el drone pueda desplazarse sobre una ruta determinada de manera autónoma. Es necesario tener en cuenta con que versiones del software se va a trabajar para no tener ningún inconveniente con la compilación o con el funcionamiento del drone.

3.2 Análisis de la programación del drone.

Se trabaja con la información que ya existe para poder programar el vuelo de un drone y poder aplicar las funciones principales como despegue, aterrizaje, estabilización y desplazamiento en las 6

direcciones básicas que un drone puede desplazarse (arriba, abajo, izquierda, derecha, adelante y atrás) por medio de programación en Python, así como el funcionamiento de la cámara y lo necesario para obtener la ruta a través de la cámara y de esta manera el drone pueda seguir la ruta. Esta información se encuentra dentro del paquete “djitellopy”, el cual contiene la implementación de todos los comandos de Tello, la recuperación sencilla de una transmisión de video y mandar y transmitir información la cual es necesarias para el funcionamiento del drone, unas de las librerías más importantes es la “tello.py” la cual contiene todos los comandos de Tello.

3.3 Pruebas de manejo y funcionamiento del drone desde la computadora.

Se usa la información obtenida para la programación del drone, los comandos necesarios y su funcionamiento para el manejo de este con ayuda de la computadora y el IDE de Python “PyCharm Community Edition” para su aplicación funcional.

3.4 Identificación de la ruta con Python a través de la cámara del drone.

Con ayuda de una cámara que el drone trae incorporada y la información que se recaudó se realizara la identificación de objetos por medio de Python. Es decir, se procesa la imagen digitalmente para posteriormente utilizarla en la detección de la ruta establecida. Es necesario hacer un filtro entre lo que sí es parte de la ruta y lo que no.

3.5 Integración y corrección de errores del vuelo junto con la detección de la ruta en el drone.

Se trabaja el manejo del drone para probar el desplazamiento en cualquier dirección, y posteriormente desarrollar un programa donde el drone sea capaz de reconocer una ruta por la cual se desplaza con ayuda de la cámara que trae integrada, y así mismo pueda realizar el vuelo de manera autónoma.

3.6 Seguimiento de la ruta por medio del drone de manera autónoma.

En esta etapa, se usa el caso de estudio, donde el drone sigue una ruta. Para esto, se toma una imagen de la cámara del drone, la cual es procesada con Python para identificar si se encuentra la ruta y el drone se pueda desplazar.

3.7 Freno y descenso de manera autónoma.

Una vez que la ruta se termina y el drone no detecte más ruta sobre la que pueda desplazarse se detendrá y comienza su descenso de manera autónoma.

3.8 Análisis de resultados.

En esta etapa se reportan los resultados obtenidos en base a la metodología presentada. A partir de esta etapa el resto de la metodología se muestra en la sección de resultados.

4. Desarrollo

De acuerdo a la metodología, en la figura 9 se muestran las librerías que se utilizan para la realización de este trabajo, así como sus versiones correspondientes. Es importante mencionar que se utiliza Python 3.9 para este proyecto, debido a que se intentó con la versión más resiente (Python 3.11, al momento de la redacción de este documento) y se tuvieron conflictos de compilación con algunas de las librerías.

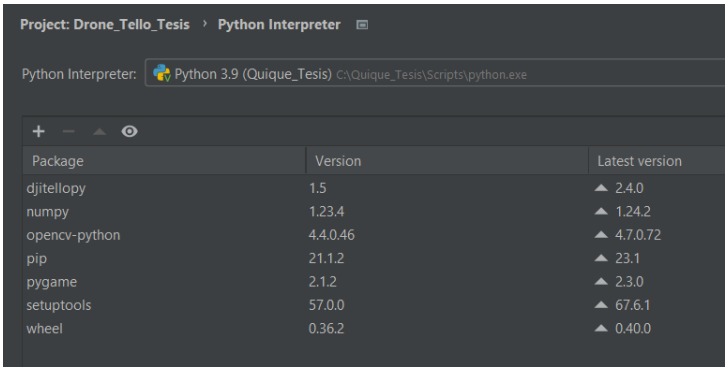


Figura 9. Versiones de las librerías y de Python usadas.

Para tener la comunicación con el drone, así como para poder enviar comandos de control al drone Tello, se requiere la librería “djitellopy”. La librería “tello.py” contiene todos los comandos de Tello. El paquete usado para interactuar con la interfaz de Python de Drones DJI Tello, desarrollada en base al Tello SDK oficial y el Tello EDU SDK, es desarrollado por Jakob Löw y Damià Fuentes Escoté como principales desarrolladores, por lo menos en la versión 1.5 de “djitellopy”, que es la usada para la implementación de este trabajo. Esta información se obtiene del Pycharm al momento de descargar los paquetes necesarios, tal y como se puede ver en la figura 10. Debido a que es Open Source, es posible que se actualice continuamente este tipo de bibliotecas.

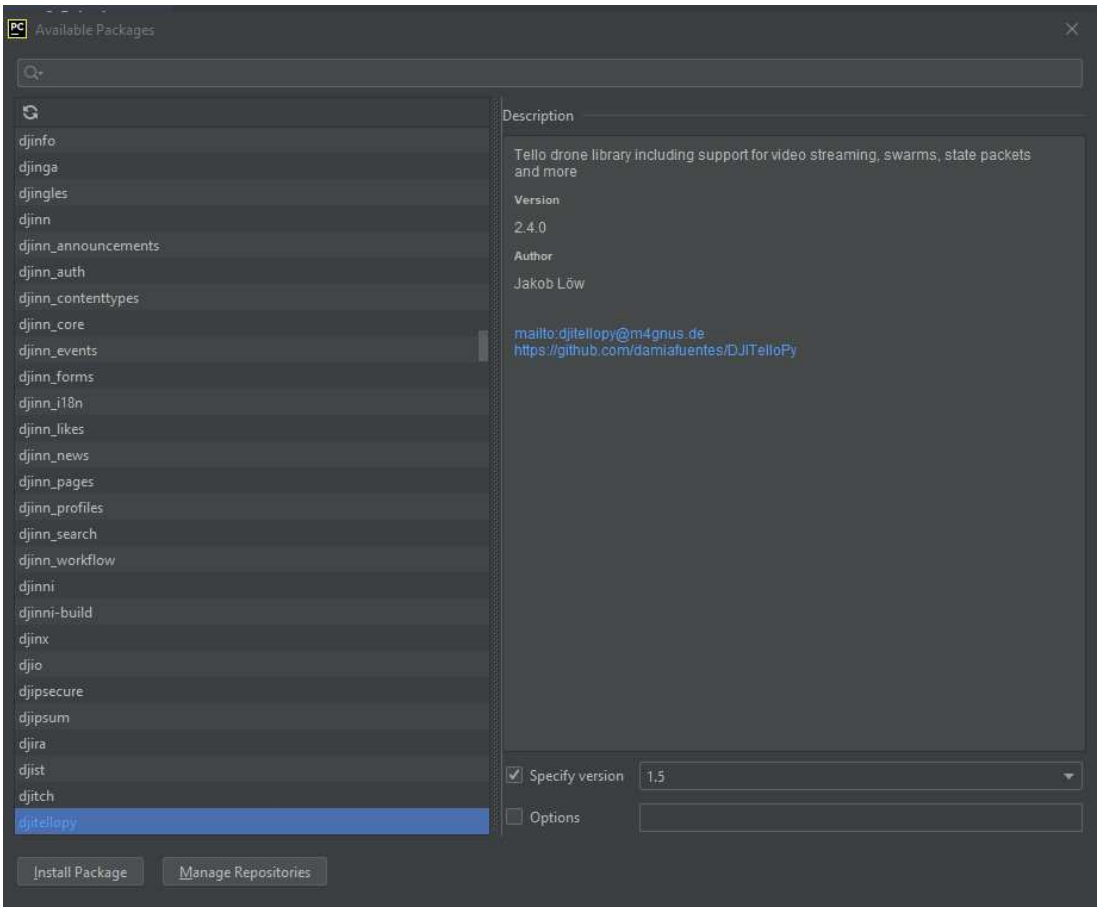
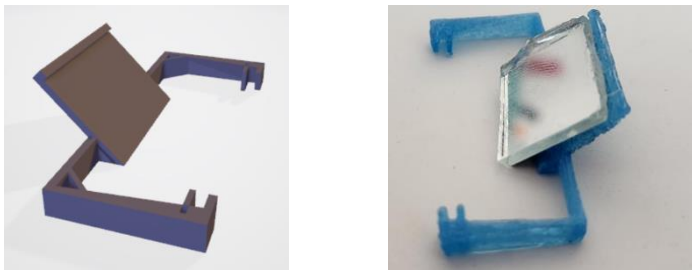


Figura 10. Información acerca del paquete “djitellopy”.

Para lograr que el drone tome imágenes hacia abajo fue necesario diseñar la pieza que se coloca frente a la cámara del drone y nos permite tomar imágenes viendo hacia el suelo cuando el drone está en vuelo. La pieza se muestra en la Figura 11.



(a) (b)

Figura 11. Pieza diseñada para una visión hacia el piso para la cámara del drone Tello. (a) Diseño en CAD. (b) Impresa en 3D.

4.1 Funciones y movimientos principales.

Los comandos que se encuentran dentro de la librería “tello” están diseñados en base a los requerimientos del fabricante y con los estándares especificados para su óptimo funcionamiento[1].

4.2 Transmisión de video y conexión del drone.

Se establece la conexión de la computadora personal (PC) con el drone y posteriormente se inicia la transmisión del video, para obtener la información de lo que se ve a través de la cámara del drone. Existen comandos específicos para realizar su conexión los cuales son llamados por las funciones de la figura 12.

```
def streamon(self):
    """Set video stream on. If the response is 'Unknown command' means you have to update the Tello firmware. That
    can be done through the Tello app.
    Returns:
        bool: True for successful, False for unsuccessful
    """
    result = self.send_control_command("streamon")
    if result is True:
        self.stream_on = True
    return result

def connect(self):
    """Entry SDK mode
    Returns:
        bool: True for successful, False for unsuccessful
    """
    return self.send_control_command("command")
```

Figura 12. Algoritmo para enviar la transmisión de video y conexión con el drone.

4.3 Desplazamiento el drone.

Para poder desplazar el drone en las cuatro direcciones (adelante, atrás, izquierda y derecha), así como arriba y abajo, incluyendo la rotación sobre su propio eje vertical, se usa una serie de comandos para enviar un intervalo de valores entre -100 y 100. Esto indica la velocidad a la que los

[1] Tello SDK. https://dl-cdn.ryzerobotics.com/downloads/tello/20180910/Tello SDK Documentation EN_1.3.pdf

motores deben de girar, es decir, la velocidad de desplazamiento. Para comenzar a desplazarse hacia adelante, el valor debe estar dentro del intervalo cerrado [1, 100]. Si se quiere desplazar hacia atrás el intervalo es [-1, -100]. Cuando el valor se ingresa en la función, se tendrá el movimiento deseado. Esto mismo se repite para movimiento a la izquierda o derecha, arriba o abajo, y la rotación sobre su propio eje vertical. El algoritmo se puede apreciar en la figura 13.

```
@accepts(left_right_velocity=int, forward_backward_velocity=int, up_down_velocity=int, yaw_velocity=int)
def send_rc_control(self, left_right_velocity, forward_backward_velocity, up_down_velocity, yaw_velocity):
    """Send RC control via four channels. Command is sent every self.TIME_BTW_RC_CONTROL_COMMANDS seconds.
    Arguments:
        left_right_velocity: -100~100 (left/right)
        forward_backward_velocity: -100~100 (forward/backward)
        up_down_velocity: -100~100 (up/down)
        yaw_velocity: -100~100 (yaw)
    Returns:
        bool: True for successful, False for unsuccessful
    """
    if int(time.time() * 1000) - self.last_rc_control_sent < self.TIME_BTW_RC_CONTROL_COMMANDS:
        pass
    else:
        self.last_rc_control_sent = int(time.time() * 1000)
        return self.send_command_without_return('rc %s %s %s %s' % (left_right_velocity, forward_backward_velocity,
                                                                    up_down_velocity, yaw_velocity))
```

Figura 13. Código usado para realizar el movimiento del drone.

4.4 Suspender el drone en el aire.

Para poder detener el drone y que se mantenga estático en el aire, se envía ceros en el código de la figura 13. De esta manera, el drone se mantiene estático en el aire unos segundos, cuando se detecta el fin de la ruta durante unos segundos. El comando usado se muestra a continuación.

drone.send_rc_control(0, 0, 0, 0)

4.5 Detección de la ruta.

Para poder distinguir la ruta que se va a seguir, es necesario implementar una umbralización, y distinguir la ruta como un objeto único de todo lo demás que puede procesarse a través de la cámara del drone. Para esto, se usa el espacio de color HSV para poder segmentarla en Tonalidad, Saturación y Valor y poder modificar sus valores para que únicamente se distinga la ruta y no el fondo de la imagen u otros objetos que no nos interesan en este momento.

Para lograr lo anterior, es necesario procesar la imagen obtenida del drone, donde se tiene la ruta a seguir y mover los valores de tonalidad, saturación y valor para poder separar la ruta en la imagen. Una vez que se obtienen los valores de la ruta, éstos se guardan en un arreglo y se imprimen para poder ingresarlos a nuestro código principal y los valores HSV de la ruta. Un ejemplo de la implementación para la adquisición de los valores de HSV se puede apreciar en la Figura 14. Los valores que se guardan en el arreglo son tomados por la función de la figura 15, para que, al mandar llamar la función, se pueda integrarlos al código principal y se use para que el drone se puede desplazar sobre la ruta.

4.6 Obtención de los contornos de la ruta.

Para obtener el contorno de la ruta, primero se obtiene la ruta a delimitar, esto para poder resaltarla con líneas que indique visualmente la ruta. Posteriormente, se realiza procesamiento de imágenes para distinguir la esquina de la imagen y poder trazar el contorno. Además, se obtiene el centro de la imagen, y calcular el centroide de la figura resaltada con líneas (la ruta) por medio de una

formula básica de matemáticas, y poder visualizar el contorno y el centro cuando se manda ejecutar la función mostrada en la figura 16.

```python
def empty(a):
    pass

cv2.namedWindow("HSV")
cv2.resizeWindow("HSV", 640, 240)
cv2.createTrackbar("HUE Min", "HSV", 0, 179, empty)
cv2.createTrackbar("HUE Max", "HSV", 179, 179, empty)
cv2.createTrackbar("SAT Min", "HSV", 0, 255, empty)
cv2.createTrackbar("SAT Max", "HSV", 255, 255, empty)
cv2.createTrackbar("VALUE Min", "HSV", 0, 255, empty)
cv2.createTrackbar("VALUE Max", "HSV", 255, 255, empty)
cap = cv2.VideoCapture(1)
frameCounter = 0

while True:
    imagen = drone.get_frame_read().frame
    #_, imagen = cap.read()
    imagen = cv2.resize(imagen, (FrameWidth, FrameHeigth))
    #imagen = cv2.flip(imagen, 0)
    imagenHSV = cv2.cvtColor(imagen, cv2.COLOR_BGR2HSV)

    h_min = cv2.getTrackbarPos("HUE Min", "HSV")
    h_max = cv2.getTrackbarPos("HUE Max", "HSV")
    s_min = cv2.getTrackbarPos("SAT Min", "HSV")
    s_max = cv2.getTrackbarPos("SAT Max", "HSV")
    v_min = cv2.getTrackbarPos("VALUE Min", "HSV")
    v_max = cv2.getTrackbarPos("VALUE Max", "HSV")

    lower = np.array([h_min, s_min, v_min])
    upper = np.array([h_max, s_max, v_max])
    mask = cv2.inRange(imagenHSV, lower, upper)
    result = cv2.bitwise_and(imagen, imagen, mask=mask)
    print(f'[{h_min}, {s_min}, {v_min}, {h_max}, {s_max}, {v_max}]')

    mask = cv2.cvtColor(mask, cv2.COLOR_GRAY2BGR)
    hStack = np.hstack([imagen, mask, result])
    cv2.imshow('Stacking', hStack)
    if cv2.waitKey(1) and 0xFF == ord('q'):
        break
```

Figura 14. Código para la obtención de los valores HSV.

```python
def umbralizacion(imagen):
    hsv = cv2.cvtColor(imagen, cv2.COLOR_BGR2HSV)
    lower = np.array([hsvVals[0], hsvVals[1], hsvVals[2]])
    upper = np.array([hsvVals[3], hsvVals[4], hsvVals[5]])
    mask = cv2.inRange(hsv, lower, upper)
    return mask
```

Figura 15. Umbralización la ruta para distinguirla.

```python
def ObtenerContornos(ImgUmbralizada, imagencontorno):
    contornos, jerarquia = cv2.findContours(ImgUmbralizada, cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_NONE)
    biggest = max(contornos, key=cv2.contourArea)
    x, y, w, h = cv2.boundingRect(biggest)
    cx = x + w // 2
    cy = y + h // 2
    cv2.drawContours(imagencontorno, contornos, -1, (0, 0, 255), 3)
    cv2.circle(imagencontorno, (cx, cy), 5, (0, 255, 0), cv2.FILLED)

    return cx, cy
```

Figura 16. Función para marcar el contorno de la ruta.

4.7 Descenso del drone al suelo.

Para el descenso se utiliza un algoritmo que manda ejecutar el comando para hacer que descienda el drone. Esto cuando el drone deja de detectar la continuidad de la ruta a seguir y comienza el descenso. Esto se muestra en la figura 17.

```
def land(self):
    """Tello auto land
    Returns:
        bool: True for successful, False for unsuccessful
    """
    return self.send_control_command("land")
```

Figura 17. algoritmo para aterrizar el drone.

5. Resultados

El drone que se está usando es marca Tello, modelo TLW004. Se usa una computadora portátil marca Dell, con procesador 12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700H, de 2.30 GHz y 32.0 GB de RAM. El sistema operativo es Windows 10 Pro de 64-bits.

Debido a que el drone mencionado solamente cuenta con una cámara, la cual se encuentra orientada hacia el frente, se requiere el uso de un espejo que permita “mirar” hacia abajo para que se pueda identificar la ruta. La figura 18 muestra el drone con el accesorio de la figura 11, en color azul.

Figura 18. Drone Tello con el accesorio de espejo para poder tomar imágenes debajo del drone.

La figura 19 muestra la imagen que se adquiere con el drone, en la cual se encuentra una franja de color blanco sobre un piso de mosaico.

Figura 19. Fotografía tomada desde el drone, hacia el piso con la ruta de color blanco.

Como se menciona en la metodología, el siguiente paso es binarizar la imagen, destacando la ruta en color blanco. El resultado se muestra en la figura 20.

Figura 20. Binarización de la imagen tomada desde el drone.

A continuación, se obtiene el contorno de la imagen binarizada, la cual se sobrepone en la imagen original, para obtener el resultado que se muestra en la figura 21.

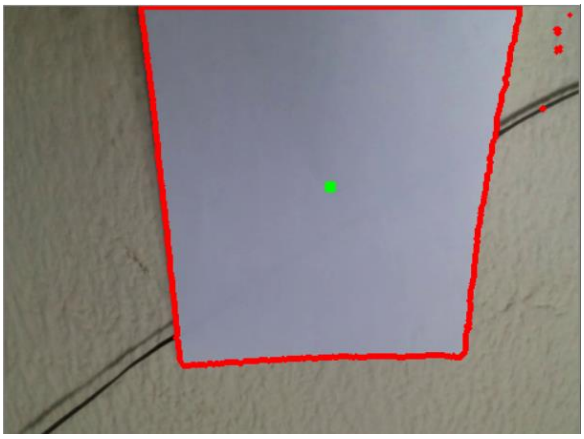


Figura 21. Resultado de la obtención del contorno de la ruta.

En la figura 21, el punto verde representa el centro del contorno, y se usa para posicionar el drone en el centro de la ruta, para que el desplazamiento del drone se mantenga en el centro del camino. Es importante mencionar que la comunicación entre el drone y una computadora es continua, debido a que la computadora solicita al drone tome una imagen, la cuál es procesada en la computadora, y dependiendo del resultado, se manda al drone el comando respectivo dependiendo de lo que se debe hacer enseguida. Es decir, avanzar, retroceder, dar vuelta a la izquierda o derecha, o girar sobre su propio eje. Todo encaminado a que el drone siga el camino y logre llegar al final de este.

6. Conclusiones

Este trabajo presenta una propuesta de metodología para la programación remota de drones Tello. Es importante resaltar que no se interfiere con el programa original del drone, sino que se hace un intercambio de información entre la computadora y el drone, usando lenguaje Python. LA computadora procesa las imágenes enviadas por el drone y de acuerdo al resultado, le indica al drone cuál es el siguiente paso. Esto tiene la ventaja de que no es necesario interferir con el programa original

del drone Tello. De esta manera, no nos preocupamos por capacidad de procesamiento del drone. Sin embargo, tiene la limitante de que el tiempo de reacción crece, debido al tiempo que se requiere para enviar las imágenes del drone a la computadora. A pesar de esto, el movimiento del drone no es tan lento, y se puede apreciar el movimiento a lo largo de la ruta. Esta metodología permitirá a otros estudiantes trabajar con este tipo de drones, y no tendrán que emplear mucho tiempo en aprender cómo trabajar con el software y el hardware.

Como trabajo a futuro, se plantea poder conseguir drones que puedan ser programados directamente en el drone. Esto debido a que en la mayoría de los drones no se puede alterar su código base. También es necesario poder usar sistemas embebidos como centros de control, evitando el costo de una computadora personal.

Referencias

[1] Santos-Castro, Alberto. "*A novel real-time image processing verification framework targeted to the zynq soc for drone localization applications*". Rochester Institute of Technology, 2017.
[2] Zhilenkov, Anton A., and Ignat R. Epifantsev. "*System of autonomous navigation of the drone in difficult conditions of the forest trails*" 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE, 2018.
[3] Miranda, Victor RF, et al. "*Autonomous navigation system for a delivery drone*". Journal of Control, Automation and Electrical Systems 33 (2022): 141-155.
[4] Vergouw, B., Nagel, H., Bondt, G., Custers, B. (2016). "*Drone Technology: Types, Payloads, Applications, Frequency Spectrum Issues and Future Developments*". In: Custers, B. (eds) The Future of Drone Use. Information Technology and Law Series, vol 27. T.M.C. Asser Press, The Hague. https://doi.org/10.1007/978-94-6265-132-6_2.
[5] Santos-Castro, A. "*A novel real-time image processing verification framework targeted to the zynq soc for drone localization applications*". Rochester Institute of Technology. 2017.
[6] Guillen, G. "*Digital Image Processing with Python and OpenCV. In Sensor Projects with Raspberry Pi*" (pp. 97-140). Apress, Berkeley, CA. 2019.
[7] Guan, Y., Zhou, F., & Zhou, J. "*Research and Practice of Image Processing Based on Python*". In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1345, No. 2, p. 022018). IOP Publishing. 2019.
[8] Alcón Clemente, J. "*Design and developement of an aplication for simulating, visualizing and comparing trajectories of Tello drones*". Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. 2019.
[9] Mandujano, S., Pazmany, M., & Rísquez-Valdepeña, A. "*Drones: una nueva tecnología para el estudio y monitoreo de fauna y hábitats*". Agroproductividad. 10: 79–84., 10(10), 79-84. 2017.
[10] Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019. 2019. https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAC-archivo/modulo2/nom-107-sct3-2019-201119.pdf

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 24, pp. 302 – 311
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Desarrollo y construcción de órtesis funcional para la rehabilitación del síndrome del túnel carpiano

Reveles Martínez Rafael[1], Omar Désiga Orenday[1], Betancourt Ramírez Bryan[1], Márquez Carlos Luis Antonio[1], Medina Haro Marco Antonio[1]

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

Resumen

El síndrome del túnel carpiano figura entre los padecimientos más presentados en las manos por personas adultas. Este proyecto tiene como objetivo desarrollar un dispositivo capaz de generar y ejecutar rutinas de ejercicio, principalmente para la rehabilitación de esta enfermedad. El sistema cuenta con rutinas predeterminadas y la posibilidad de crear rutinas propias que pueden ser delimitadas por el paciente afectado, así como por el encargado de supervisar la terapia. Dado que el síndrome del túnel carpiano es una condición degenerativa, los movimientos requeridos para la rehabilitación están orientados a reducir el impacto de la enfermedad. El dispositivo será mecánico y electrónico y se controlará mediante una aplicación móvil, con lo cual se permitirá mover los dedos, realizando extensión de falanges, cierre de puño o movimientos independientes. En el documento se presentan el modelo y resultados de simulación mecánica del sistema.

Palabras clave: Órtesis, movilidad, recuperación, rehabilitación, mano, túnel carpiano

1. Introducción

El paso del tiempo conlleva el envejecimiento del ser humano, lo cual puede resultar en el deterioro de células y tejidos, causando problemas de salud y enfermedades. Un ejemplo claro de esto es el **Síndrome de Túnel Carpiano**, también conocido como Parálisis tardía del Nervio mediano, una lesión compresiva de dicho nervio que puede provocar déficit motriz y sensitivo en la mano [1]. Según estimaciones del año 2016, esta afección afectaba al 3.8% de la población general de México [2].

Dado que el Síndrome de Túnel Carpiano es una enfermedad crónica degenerativa, no se puede eliminar por completo, pero su avance puede retrasarse mediante la realización de rutinas de ejercicios de terapia o, en casos más graves, con cirugía [3].

Sin embargo, el camino de la terapia no es económico. Se estima que en Estados Unidos alrededor de 1 millón de adultos solicitan tratamientos, con gastos que oscilan entre 1 y 2 billones de dólares al año [4].

Es importante tener en cuenta que para obtener resultados adecuados del tratamiento se requiere constancia, ya que es un proceso progresivo que puede durar meses o incluso años, dependiendo de la gravedad de los síntomas y la respuesta del paciente. En México, los gastos por terapia son de al menos $300.00 MXN por sesión [5]. Estos costos a menudo llevan a que algunas personas afectadas por la enfermedad opten por no recibir tratamiento, lo que acelera la progresión del padecimiento.

Por esta razón, se plantea en este artículo el diseño de un dispositivo accesible para las personas afectadas por el Síndrome de Túnel Carpiano, que pueda ser utilizado tanto en casa como en un centro de rehabilitación profesional. Aunque no es posible eliminar completamente los costos del tratamiento, se espera que este dispositivo reduzca significativamente los gastos.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 24, pp. 302 – 311
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

A pesar de que existen varios dispositivos en el mercado que ayudan en la rehabilitación, muchos de ellos son meramente productos de mercadotecnia. Los equipos comerciales ofrecen ejercicios para el miembro afectado, pero no permiten un control basado en la progresión de la enfermedad y solo realizan movimientos predefinidos e inflexibles.

El proyecto abordado en este artículo propone el diseño de un dispositivo mecatrónico que permita a los usuarios realizar ejercicios de extensión y flexión de las falanges de los dedos de manera controlada e independiente. Además, se busca que sea ergonómico para la comodidad del paciente y que presente una interfaz amigable para el usuario.

2. Metodología

Se utilizó un enfoque basado en la metodología de diseño mecatrónico para desarrollar el prototipo. Se diseñó un prototipo de órtesis de mano capaz de llevar a cabo rutinas de ejercicios beneficiosos para la terapia, con el objetivo de reducir el impacto de la enfermedad en las personas que padecen el síndrome del túnel carpiano. El dispositivo se basa en las medidas promedio de una mano adulta en la población mexicana. A través de una aplicación móvil, los usuarios pueden seleccionar una rutina que establezca el rango de extensión o flexión para cada dedo de la mano derecha, así como para todos los dedos en conjunto. Además, dicha aplicación es capaz de conectarse con el dispositivo mediante comunicación Bluetooth.

2.1 Diseños conceptuales

Para definir el proceso de rehabilitación de la órtesis, se elaboraron varios diagramas IDEF-0, basados en las funciones del sistema y en las necesidades del usuario. El diagrama correspondiente se muestra en la Figura 1.

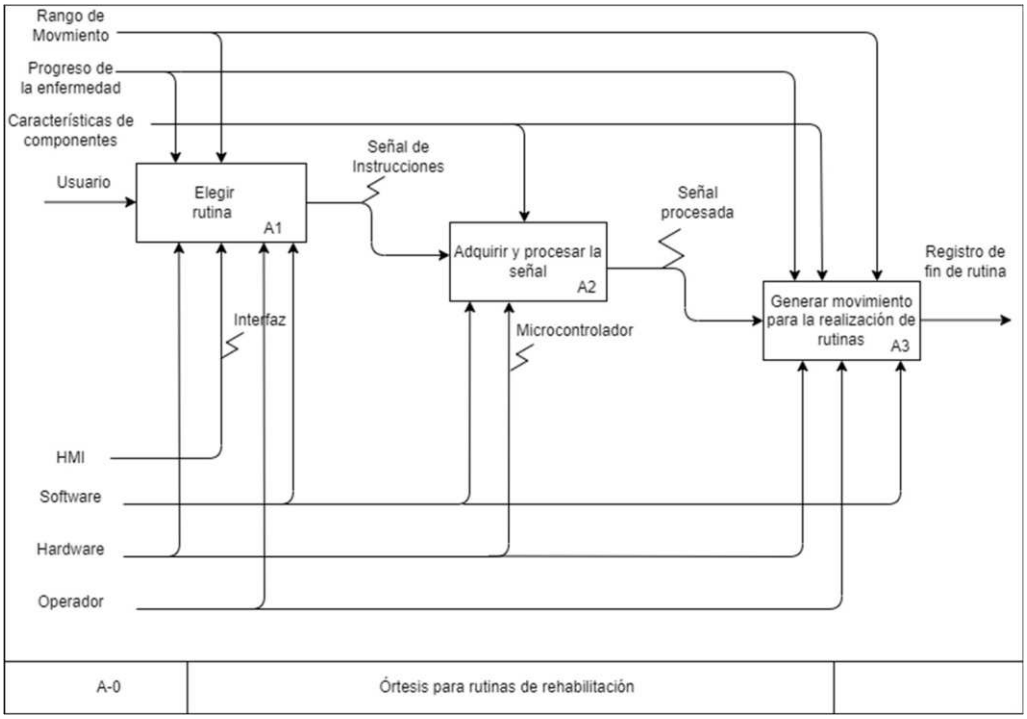


Figura 1. Diagrama IDEF A0. Órtesis para rutinas de rehabilitación.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 24, pp. 302 – 311
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

2.2 Diseño mecánico

Para el diseño mecánico del dispositivo, se tuvieron en cuenta las dimensiones promedio de las falanges de una mano adulta en la población mexicana [6]. Con esta información, se llevó a cabo la síntesis del mecanismo para cada uno de los dedos de la mano, como se muestra en la Figura 2.

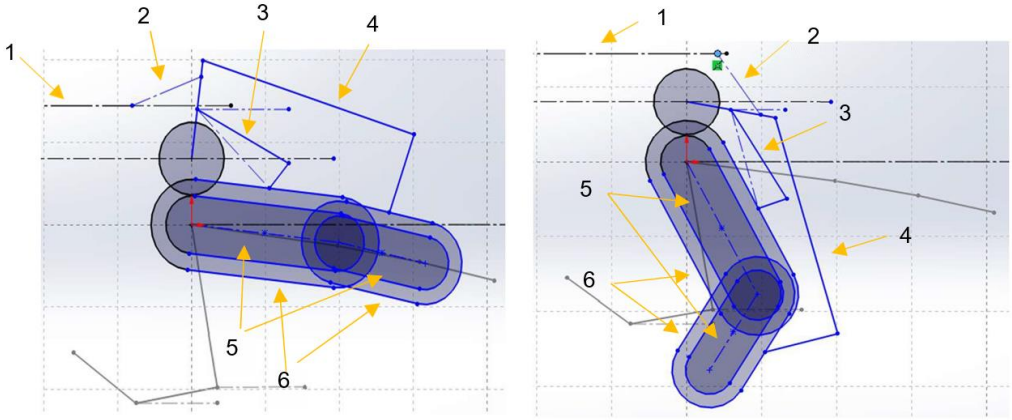


Figura 2. Síntesis del mecanismo a) dedo en extensión y b) dedo en flexión.

Con base en esta información, se procedió al diseño del mecanismo encargado de mover los dedos, el cual consta de una base que sostendrá los actuadores lineales. Estos actuadores moverán las barras encargadas de transmitir la fuerza de movimiento aplicada, las cuales a su vez estarán conectadas a anillos que se sujetarán a las falanges proximales y mediales de los 5 dedos de la mano derecha. Este diseño se muestra en la Figura 3.

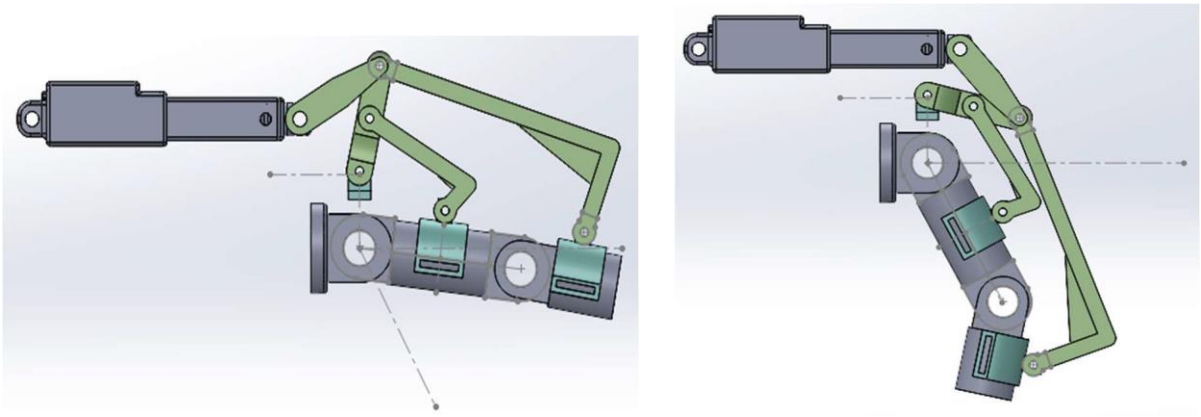


Figura 3. Ensamble del mecanismo para el dedo índice en a) extensión y b) flexión.

2.3 Diseño electrónico

Para la selección de los componentes eléctricos se tomó en cuenta la síntesis del mecanismo de la Figura 2, la carrera del vástago, así como el tipo de control que se implementará. En la síntesis se especifica que para el cierre total del puño se requiere que el actuador recorra una distancia máxima de 0.32 m.

Para seleccionar el motor que mejor se ajustara a las necesidades del sistema, se realizó el cálculo de la fuerza en los eslabones implicados. Dado que la barra que sujeta la falange medial es la más probable a fallar, se hizo el análisis en esta barra en particular. Se tienen cifras de que el dedo anular es el dedo

más fuerte, con una capacidad de carga de 25 N [7]. Con estos datos, se procedió a realizar los cálculos correspondientes.

La Figura 4 muestra el modelado del sistema para realizar el análisis de fuerzas. Con base en este modelo, se realizó el análisis para obtener la fuerza total necesaria para mover las falanges de cada dedo y se obtuvieron los resultados de las ecuaciones 1, 2 y 3. Suponiendo que el vector FM es la fuerza necesaria que debe ejecutar el motor para mover el mecanismo en respuesta a la fuerza de resistencia del dedo más fuerte, trasladamos la fuerza del dedo hasta este vector a través de momentos, obteniendo así la fuerza máxima que deben superar los motores.

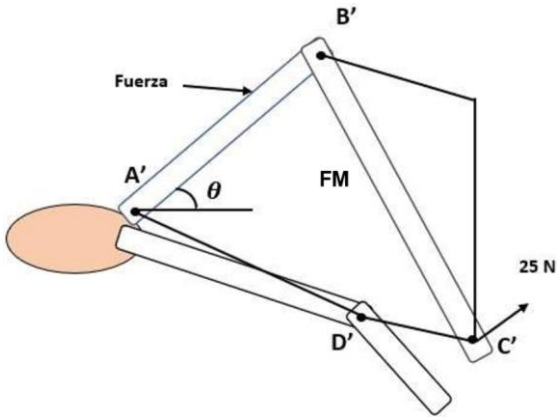


Figura 4. Sistema modelado para análisis de fuerzas.

$$T_{\mathrm{B}}^{\mathrm{i}} = (78.22 \times 10^{-3}) * 22.86 = 1.788\ N * m \tag{1}$$

$$F_{\mathrm{M}} * (25 \times 10^{-3}) = 1.788 \Rightarrow F_{\mathrm{M}} = 71{,}52\ N \tag{2}$$

$$F_{\mathrm{N_x}} = 71.52 * \cos(172.7) = -70{,}94\ N \tag{3}$$

Del resultado de la ecuación 3 se obtuvo que la fuerza máxima para mover los dedos es de 70,94 N. Teniendo todo lo mencionado anteriormente en cuenta, se planteó utilizar los siguientes componentes:

- Actuadores lineales (Actuonix L12R50 210).
- Microcontrolador Arduino MKR 1010 Wifi.
- Fuente de voltaje de 5 V a 10 A.

En la figura 5 se muestra el esquema eléctrico completo del sistema.

El Arduino recibe la señal enviada por el smartphone desde la aplicación móvil, que a su vez envía una señal PWM a los actuadores lineales que abren el vástago hasta la distancia seleccionada dentro del rango de 0 – 0,32 m. Tanto el Arduino como los servomotores se alimentan mediante una fuente conmutada.

2.4 Diseño del software

Para comenzar con el diseño del sistema se desarrolló un diagrama de flujo donde se explica en términos generales el funcionamiento del software de la aplicación móvil. El diagrama completo se muestra en la Figura 6.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 24, pp. 302 – 311
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

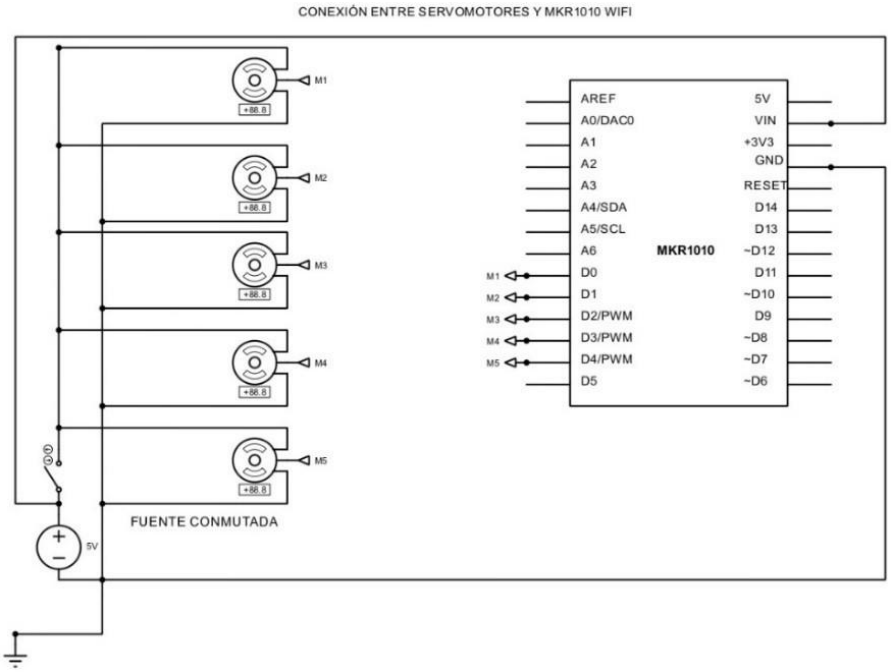


Figura 5. Diagrama eléctrico de conexiones entre servomotores y controlador.

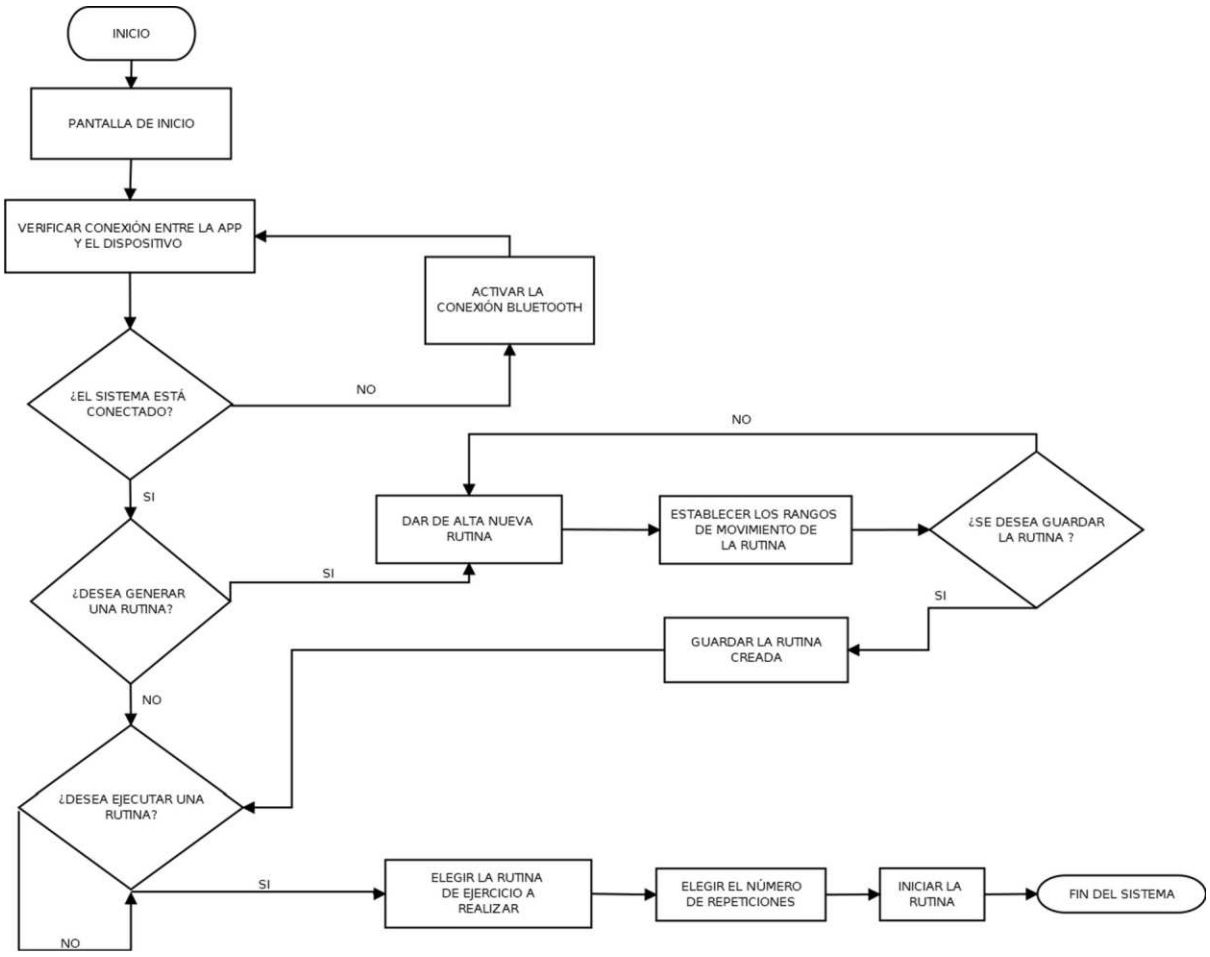


Figura 6. Diagrama de flujo.

Para entender mejor las necesidades del sistema se establecieron los requerimientos para el correcto funcionamiento de la aplicación y su conexión con el prototipo. En las tablas 1 y 2 se muestran los requerimientos funcionales y no funcionales, respectivamente.

Tabla 1. Requerimientos Funcionales de la aplicación.

Nombre	Identificador	Descripción
Seleccionar dispositivo	RF_01	Permitirá realizar la conexión entre el dispositivo y la aplicación móvil mediante conexión bluetooth.
Configurar rutina	RF_02	Permitirá seleccionar el rango de movimiento que se tiene en cada dedo, además de definir el nombre que tendrá la rutina, para posteriormente guardar la rutina en el dispositivo.
Seleccionar rutina	RF_03	Permitirá elegir entre todas las rutinas que estén guardadas en el dispositivo incluyendo las que se den de alta por el usuario.
Eliminar rutina	RF_04	Permitirá eliminar las rutinas dadas de alta por el usuario que estén guardadas en el dispositivo.
Seleccionar número de repeticiones	RF_05	Permitirá al usuario definir el número de repeticiones que realizará cada ejercicio.
Ejecutar rutina	RF_06	Detendrá o ejecutará la rutina según sea deseado por el usuario.

Tabla 2. Requerimientos No Funcionales de la aplicación.

Nombre	Identificador	Descripción
Aviso de conexión	RNF_01	La aplicación debe avisar al usuario en todo momento su estado de conexión con el dispositivo.
Conectividad constante	RNF_02	La aplicación debe ser capaz de mantenerse conectada en todo momento de uso de la órtesis utilizando comunicación bluetooth.
Ejecución en tiempo real	RNF_03	El sistema completo debe poder reaccionar en tiempo real a las ejecuciones que dé la aplicación.

Una vez establecidos los requerimientos de la aplicación, se elaboró el diagrama UML de casos de uso para observar claramente la relación entre el usuario, la aplicación y el controlador integrado en la órtesis. El diagrama se muestra en la figura 7.

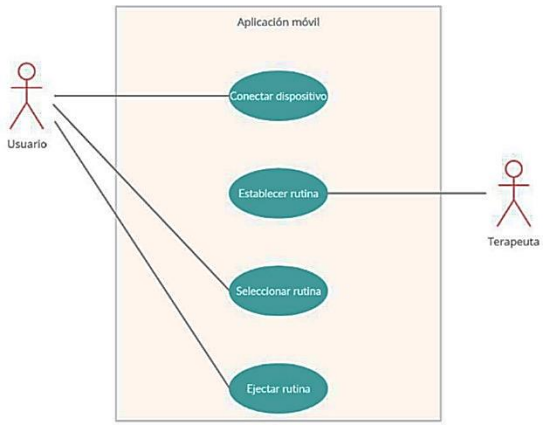
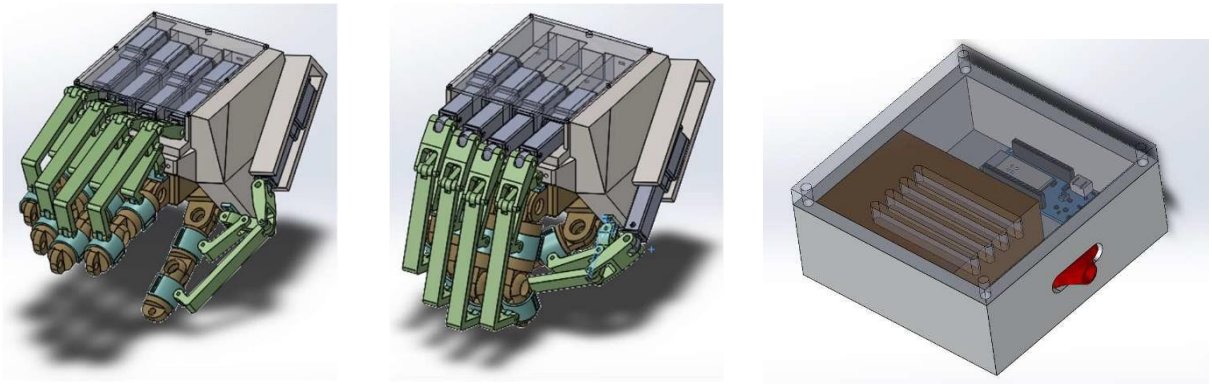


Figura 7. Diagrama UML de casos de uso.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 24, pp. 302 – 311
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

3. Resultados

Con el diseño de todas las piezas, se realizó el ensamblaje de la órtesis, así como el compartimento por separado donde se colocarán los componentes electrónicos, tales como el Arduino y la fuente conmutada. Este resultado se muestra en la Figura 8.



a) b) c)

Figura 8. Ensamblaje del mecanismo aplicado para la mano completa en a) extensión y b) flexión; c) compartimento para el sistema electrónico.

3.1 Simulaciones

Para comprobar que se cumpliera con las posiciones del ensamble de acuerdo con la cinemática calculada, se realizó una simulación en un software específico. La Figura 9 muestra las posiciones calculadas del mecanismo.

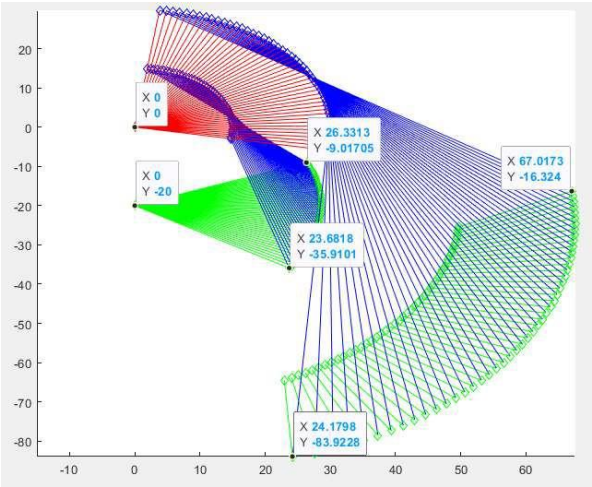


Figura 9. Posiciones calculadas del mecanismo.

Con esto se ubicaron en el mecanismo los ángulos iniciales y finales de las barras, y a partir de esto se acotaron las conexiones de los anillos con respecto al mismo origen trazado en la cinemática. Como se puede observar en la Figura 10, las variaciones con respecto a la cinemática son despreciables, las cuales se originan debido al redondeo de valores..

Una vez que se corroboraron las posiciones, se realizó un análisis estático, mostrado en la figura 11, con la finalidad de determinar si resistirá a las condiciones a las que será expuesto. Al aplicarle las fuerzas de 80 N que ofrece el motor y la resistencia de la mano de 25 N, se obtuvo un factor de seguridad FS= 1.070, lo que significa que el mecanismo está diseñado para soportar las cargas.

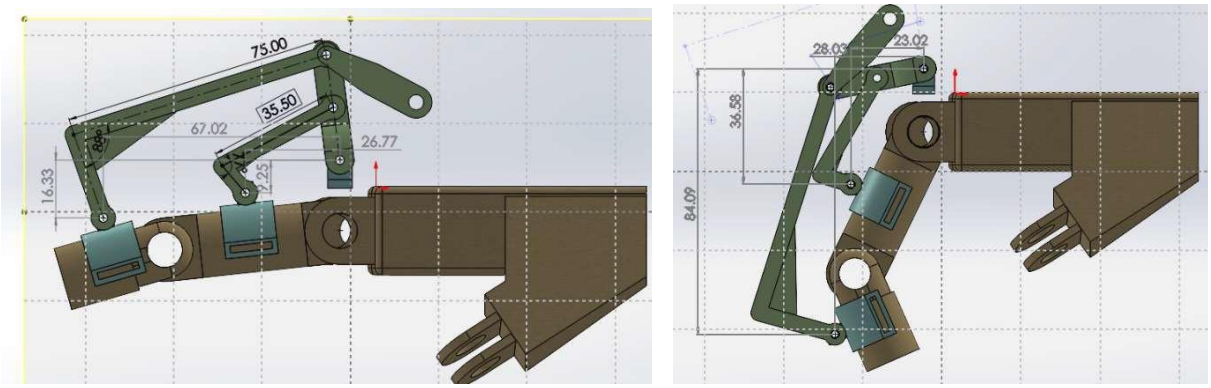


Figura 10. Posiciones simuladas del mecaismo.

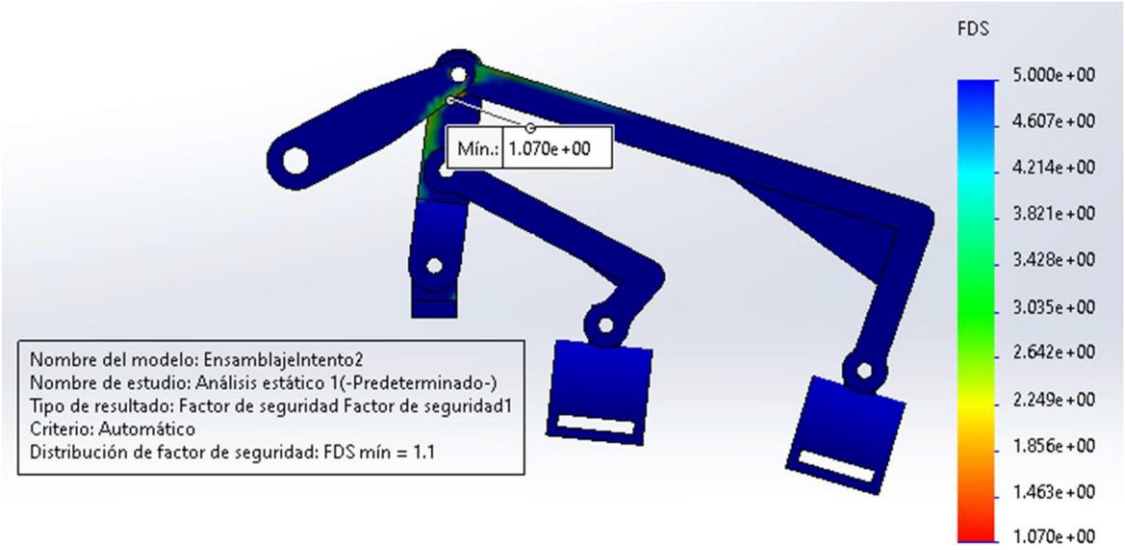


Figura 11. Resultado del análisis estático del mecanismo para el Factor de Seguridad (FS).

3.2 Aplicación móvil

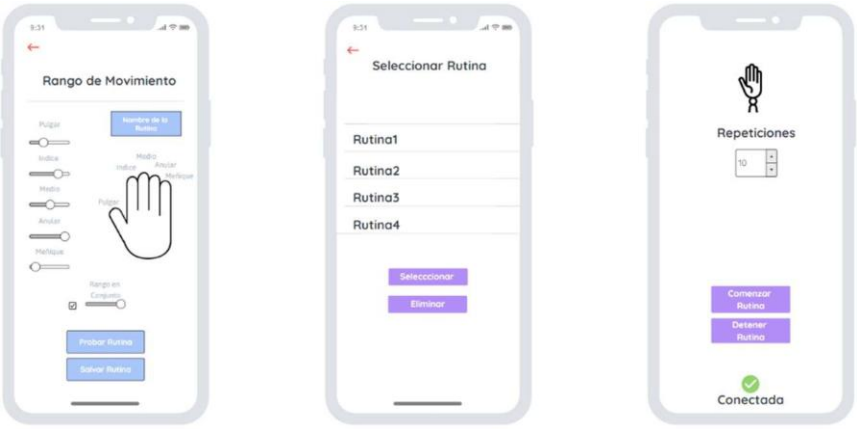
Ya definidas las características de la aplicación, se elaboró un diseño general de cómo se verá la aplicación terminada, el cual se muestra y se describe a continuación.

En la pantalla inicial se muestran las funciones con las que cuenta la aplicación, teniendo la opción de poder realizar la conexión Bluetooth, hacer la selección entre todas las rutinas establecidas o dar de alta una nueva rutina (figura 12a). En la pantalla "buscar dispositivo", al presionar el botón que se encuentra en ella, se dirigirá a otra pantalla que mostrará los dispositivos Bluetooth disponibles y donde se podrá realizar la conexión entre el dispositivo y la aplicación (Figuras 12b y 12c)

Al seleccionar la opción de establecer rutina, se desplegará una pantalla que tendrá la opción de seleccionar el rango de operación para cada dedo, guardar la rutina y darle nombre (figura 13a). La opción de seleccionar rutina desplegará una pantalla que mostrará todas las rutinas que estén guardadas en el sistema y permitirá seleccionar entre una de ellas (figura 13b). A partir de seleccionar una rutina, el usuario será capaz de elegir el número de repeticiones que realizará de dicho ejercicio, además de tener la opción de iniciar o detener la rutina en el momento que desee (figura 13c).

a) b) c)

Figura 12. Pantalla de la aplicación móvil a) principal, b) buscar dispositivos y c) lista de dispositivos.



a) b) c)

Figura 13. Pantalla de la aplicación móvil a) control de rango de movimiento, b) selección de rutina c) inicio y paro de emergencia.

4. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos mediante el proceso de diseño, se puede concluir que el prototipo propuesto es adecuado para llevar a cabo una rutina de rehabilitación para la enfermedad del síndrome del túnel carpiano. El mecanismo propuesto, basado en la cinemática de la mano, es capaz de seguir las trayectorias descritas para cada falange, además de estar diseñado para soportar la fuerza ejercida por la mano del paciente, así como la fuerza generada por los motores seleccionados durante el diseño mecánico, los cuales fueron elegidos mediante un cálculo dinámico que resultó en la capacidad de vencer la fuerza ejercida por el dedo humano.

Referencias

[1] F. Garmendia García, F. W. Díaz Silva, and D. Rostan Reis, “Síndrome del túnel carpiano,” *Rev. Habanera Cienc. Médicas*, vol. 13, no. 5, pp. 728–741, 2014.
[2] E. P. N. de Atención, “SÍNDROME DE TÚNEL DEL CARPO”.
[3] R. G. Z. Saiz and J. P. Torrico, “Terapia manual en el síndrome del túnel carpiano.,” *Rev. Investig.*

Educ. En Cienc. Salud RIECS, vol. 2, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2017, doi: 10.37536/RIECS.2017.2.1.19.

[4] N. Montes Carrasco, “Efectividad de la movilización neural del nervio mediano en el síndrome del túnel carpiano no intervenido. Revisión sistemática y metaanálisis,” Universidad de Salamanca, 2019. doi: 10.14201/gredos.140462.

[5] L. D. Sánchez Velázquez, “Análisis de costos en las Unidades de Terapia Intensiva mexicanas. Estudio multicéntrico,” *Med. Crítica*, vol. 24, no. 4, pp. 159–166, 2010.

[6] E.-E. López-López, R. Martínez-Méndez, and A. H. V. González, “Diseño de una prótesis de mano para uso en teclados con interfaz sEMG.,” *ReCIBE Rev. Electrónica Comput. Informática Bioméd. Electrónica*, vol. 8, no. 1, pp. 47–69, 2019.

[7] E. P. Flores Romero and K. Y. Morales Ruíz, “Diseño y construcción de un aparato auxiliar en la rehabilitación para disminuir la rigidez de la mano,” Unidad Profesional Interdisciplianria de Ingeniería Campus Zacatecas, 2020.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 25, pp. 312 - 330.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Simulación de una plataforma robótica móvil en ROS mediante el simulador Gazebo.

Arroyo Romero José Ángel, González Barbosa José Joel, Ruiz Torres Maximiano Francisco, Sandoval Castro Xochitl Yamile, Francisco Javier Ornelas Rodríguez.

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (Qro).

Resumen

En el campo de la robótica móvil, la creación de prototipos presenta costos y tiempos de fabricación bastante elevados, por lo cual se utilizan simulaciones que ayudan a identificar y visualizar el comportamiento de los robots antes de su construcción. Existen múltiples softwares que permiten generar este tipo de simulaciones, uno de ellos es presentado en este trabajo. Nuestro objetivo es presentar las diferentes etapas a desarrollar en el simulador Gazebo, tomando como caso de estudio una plataforma robótica móvil de tracción diferencial, creamos un entorno virtual de navegación, aplicamos un sistema de localización y mapeo simultaneo (SLAM), finalmente determinamos los recursos computacionales mínimos para su funcionamiento, mediante el framework ROS (Robot Operating System).

Palabras clave: simulación, ROS, Gazebo

1. Introducción

En la actualidad, la robótica se encuentra en casi todos los sectores de nuestra vida. La necesidad de utilizar dispositivos robóticos va en aumento ya que pueden realizar tareas que resultan repetitivas o peligrosas para los seres humanos. Tareas como labores de vigilancia, limpieza o exploración. Para ejecutar este tipo de tareas existe un área de la robótica denominada robótica de servicio. La robótica de servicio tiene un amplio campo de aplicaciones, muchas de las cuales tienen diseños únicos con diferentes grados de automatización y autonomía. Por ello, la industria de los robots de servicios es más diversa que la robótica industrial [1]. En la robótica de servicio, el robot necesita comprender su entorno, por lo que existe una gran diversidad de métodos que permiten conocer su área de trabajo. Uno de los métodos más utilizados es SLAM “Simultaneous Localization and Mapping”, cuya principal función es la generación de mapas para su auto localización dentro del entorno, mediante mediciones de distintos sensores ultrasónicos, cámaras, LiDAR, etc.

Cuando se trabaja en temáticas de localización y mapeo simultáneo, una de las principales consideraciones es el requerimiento mínimo de software para su implementación. En [2] revisaron los requerimientos de mínimos de software para la implementación de SLAM en una plataforma robótica móvil, implementada dentro de ROS (*Robot Operating System).* Desarrollado dentro del sistema operativo (Ubuntu) con el uso de un sensor LiDAR y el algoritmo gmapping para aplicaciones de navegación en interiores.

En el artículo [3], utiliza la simulación en Gazebo para obtener las mediciones de velocidad traslacional y posición, determinado por un algoritmo de localización y mapeo simultáneo (SLAM) a bordo de un cuadrirrotor. El factor de escala de la posición se desconoce cuándo el algoritmo SLAM utiliza la información de una cámara monocular, se diseña además un observador determinístico para reconstruir la velocidad traslacional del cuadrirrotor. El observador y estimador están diseñados a través de simulaciones numéricas usando un simulador Gazebo, así como las pruebas experimentales.

En [4], los autores crearon una simulación del manipulador Turtlebot mediante el algoritmo gmapping en ROS. Los autores construyen un ambiente para mapear a partir de un modelo virtual de robot generado en Gazebo, con el objetivo de definir las características de software y hardware necesarias para el correcto funcionamiento de este algoritmo, además de experimentar e implementar la navegación autónoma. Los métodos de SLAM y los algoritmos de planificación de rutas son utilizados en la navegación autónoma. En la simulación, el robot logró llegar a su destino sin colisionar, lo que garantiza que el algoritmo gmapping es adecuado para una aplicación en condiciones reales. En [5], tiene como objetivo explorar los principales paquetes LiDAR 2D de localización y mapeo simultáneo en el sistema operativo (ROS). Se utilizó el kit Turtlebot3 y las herramientas visuales Gazebo y Rviz, con los algoritmos Gmapping, Hector Slam, Cartographer, SLAM Toolbox, Iris y Lama; para determinar cuál es el SLAM más apropiado de acuerdo al requerimiento del autor.

En [6], se presenta la propuesta de una plataforma robótica móvil desarrollada con ayuda de Matlab y ROS. La plataforma es utilizada con fines didácticos para explicar el funcionamiento e instrumentación de una plataforma robótica, así como el uso de herramientas digitales para el análisis de sistemas robóticos mediante el uso de simulaciones realizadas en Gazebo. Los resultados presentan una respuesta para solventar los problemas de recursos materiales y temporales a los que el ámbito docente tiene que hacer frente con más frecuencia de la deseable, mostrando un resultado satisfactorio. En [7], se presenta un análisis de seis plataformas de simulación 3D tipo “open source” para el desarrollo de simulación dinámica de robots. Estas permiten crear un entorno virtual para que el robot pueda ser estudiado tanto en su cinemática como en su dinámica y realizar simulaciones que permitan validar la planeación de movimientos y trayectorias para mantener la coordinación de los robots seriales en los procesos de manufactura, evitando posibles colisiones en el desarrollo de la programación cuando se quiere realizar una modificación de las tareas que ejecuta el robot. En [8], se describe la importancia del uso de simuladores como Gazebo en los entornos de programación como ROS. Pues permiten conocer el comportamiento del robot en la aplicación deseada por el diseñador o actividades multitarea y determinar los costos computacionales o posibles problemas referentes a los tiempos de ejecución.

En [9], se presenta el diseño y desarrollo de un robot aéreo, evaluando los sensores con los que se instrumentará en una simulación realizada en Gazebo. Se evalúa el desempeño del robot aéreo generando perturbaciones en su funcionamiento dentro de la simulación, mediante uso de cambios atmosféricos y físicos como el tiempo que demora en estabilizarse en caída para para garantizar la confiabilidad de la instrumentación en una aplicación real. En [10], se presenta un entorno de robótica ROS en un software libre, multiplataforma (Linux, Windows, MacOS) y hace énfasis en la programación de la inteligencia de los robots. Los autores utilizan el simulador Gazebo como referencia y Python como lenguaje para evaluar la complejidad de uso, con el objetivo de determinar las ventajas que se pueden alcanzar con el uso recursos de simulación virtual.

2. Diseño de plataforma robótica móvil.

En este artículo se explica la metodología para desarrollar una plataforma robótica móvil en ROS, que sirva de guía para la creación de robots virtuales. ROS de define como un framework dedicado a la robótica, sus programas son de código abierto y uso gratuito tanto para la investigación como para fines comerciales e integrables con todo el software de robótica existente. Por ello, el sistema se creó teniendo en cuenta otras plataformas de software abiertas ya existentes como OpenCV y Gazebo, existiendo paquetes específicos para su uso en ROS.

2.1 ROS

ROS proporciona también servicios propios de un sistema operativo, pero sin serlo, ya que se instala sobre Linux y de manera recomendada Ubuntu, por ello también recibe la denominación de *Meta-Sistema Operativo*. Su estructura es modular en cada programa o aplicación, lo que se

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 25, pp. 312 - 330.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

denomina como nodo, se ejecuta dentro otro ejecutable(Master) que funciona de núcleo del sistema y comunican los diferentes nodos mediante *topics* y/o servicios [11].

El sistema de archivos de ROS se divide básicamente en dos niveles:
1). Paquetes "packages": Son el nivel más bajo de organización de ROS. Pueden contener "nodos" modelos, tipos de mensajes y servicios, herramientas o librerías.
2. Pilas "Stacks": Son agrupaciones de paquetes que forman una librería de alto nivel. Al ser descargados e instalados, las pilas se agrupan en repositorios de Linux, los repositorios de ROS pueden ser descargados equivalentes a los de Linux. Todo el sistema de ROS se instala en la dirección */opt/ros,* genera una carpeta de trabajo (ros_workspace) para crear aplicaciones en esa dirección y añade al path de ROS para que este tenga acceso [11][12].

2.2 Gazebo

El desarrollo de la plataforma robótica móvil se efectúa en Gazebo. Este cuenta con un simulador 3D cinemático, dinámico y multi-robot que permite realizar simulaciones de robots articulados en entornos complejos de interiores o exteriores, realistas y tridimensionales. Podemos ejecutar Gazebo desde ROS y utilizar la aplicación para controlar los robots en las simulaciones, es decir, enviar y recibir datos. Presenta una simulación realista de la física de los cuerpos rígidos, además los robots pueden interactuar con el mundo: empujar cosas, rodar y deslizarse en el suelo, afectados por la gravedad y pueden colisionar con obstáculos. Gazebo permite desarrollar y simular modelos de robots (URDF), [11].

La plataforma robótica móvil propuesta para esta investigación, es una unidad diferencial con dos ruedas motrices y una rueda de apoyo. Para el desarrollo virtual de esta plataforma móvil se propone simplificar el robot a una geometría cubica 25cm x 25cm x 15cm, esto para facilitar el entendimiento de las propiedades físicas del mismo. Se considera que este robot esta instrumentado con un sensor laser y una cámara. Se planea utilizar el simulador Gazebo para evaluar el desempeño del modelo virtual en condiciones extremas sin dañar el hardware tal como se propone en [13]. El primer paso para el desarrollo de la plataforma móvil es inicializar el software, se selecciona el menú *Edit* en la esquina superior izquierda. Como se muestra en la Figura 1.

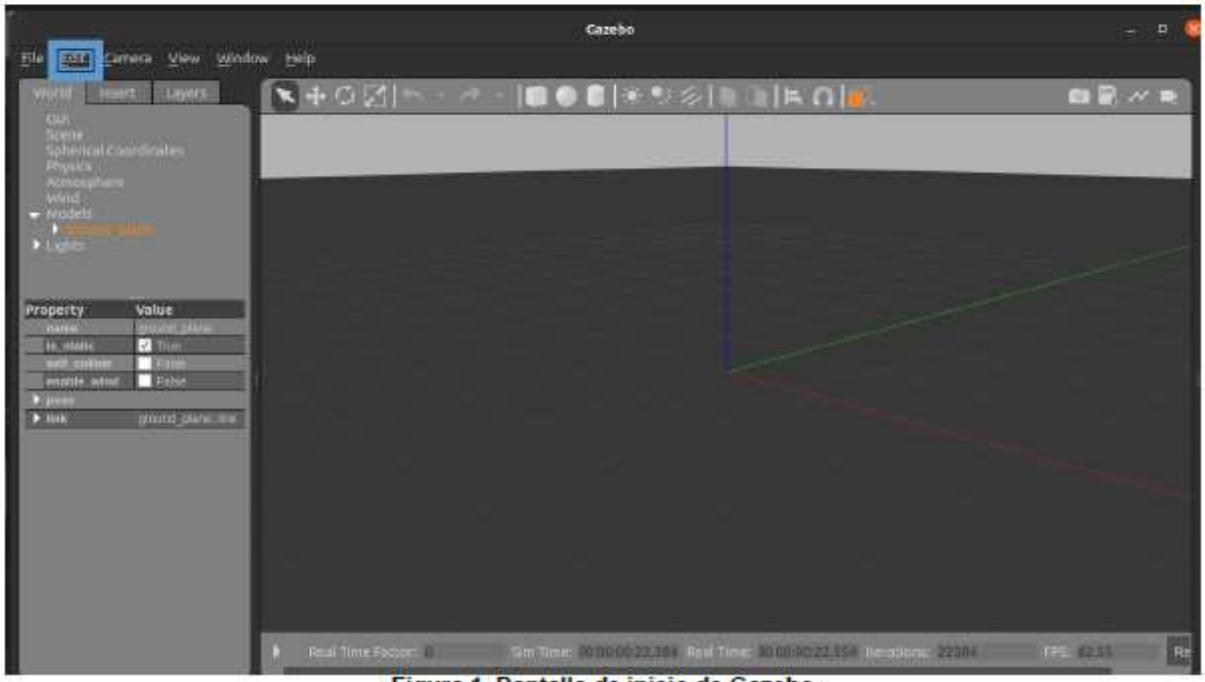


Figura 1. Pantalla de inicio de Gazebo.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 25, pp. 312 - 330.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Se desplegará una pantalla de edición de modelo. En la pantalla, de lado izquierdo se observan tres objetos principales, un prisma circular, un cubo y una ésfera, las cuales sirven para realizar los modelos base de cualquier diseño. Como se muestra en la Figura 2.

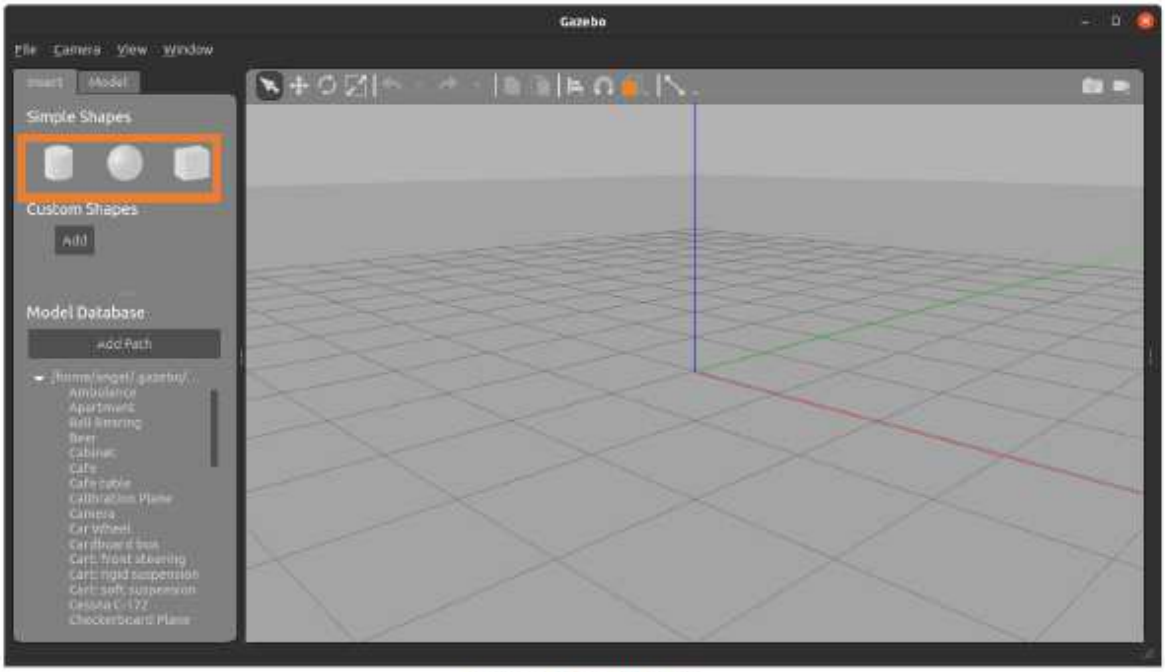


Figura 2. Model Edit.

En el caso de estudio de la plataforma móvil se selecciona el cubo con el botón izquierdo del ratón y se coloca sobre el entorno de trabajo. Como se muestra en la Figura 3.

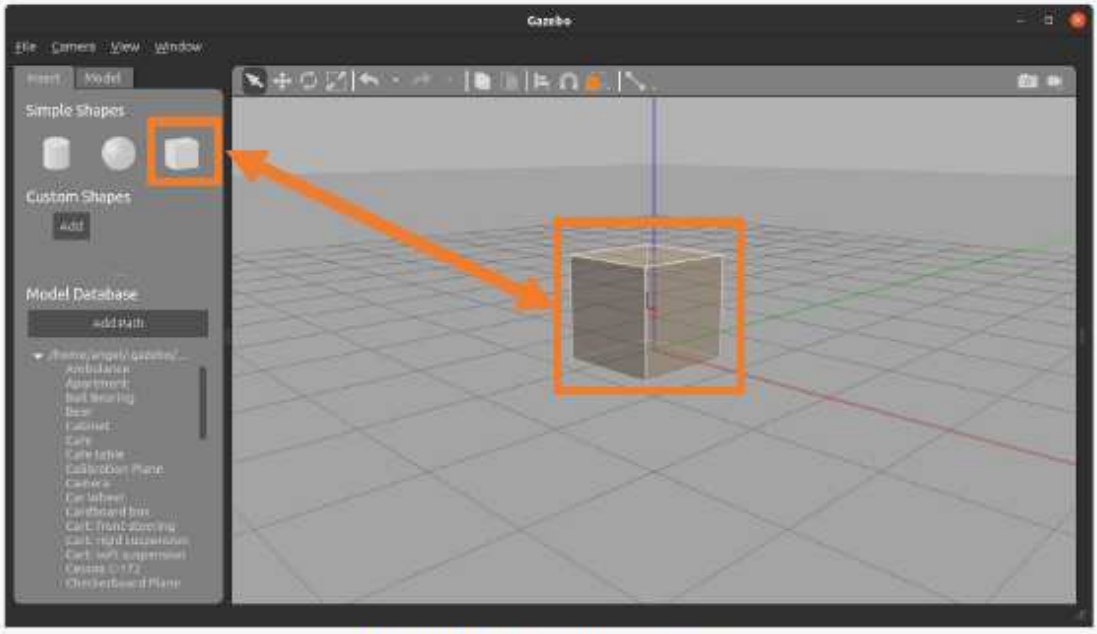


Figura 3. Cubo base para chasis.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 25, pp. 312 - 330.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Para poder editar el chasis (cubo), con botón derecho sobre el cubo pre definido por Gazebo aparecerá un apartado con el nombre de *link inspector* el cual abre un menú. Como se muestra en la Figura 4. Con tres sub menús de edición. Comenzaremos con el sub menú *visual*, en este apartado podremos editar la posición respecto al sistema de coordenadas global definido por Gazebo como coordenadas (0,0) y editar las dimensiones de nuestro modelo. Se puede observar que el cubo se reduce dentro de un cubo más grande, el cubo más grande representa el espacio de colisión (espacio que interactúa con otros componentes de la simulación), el cubo pequeño es el que se podrá visualizar en la simulación.

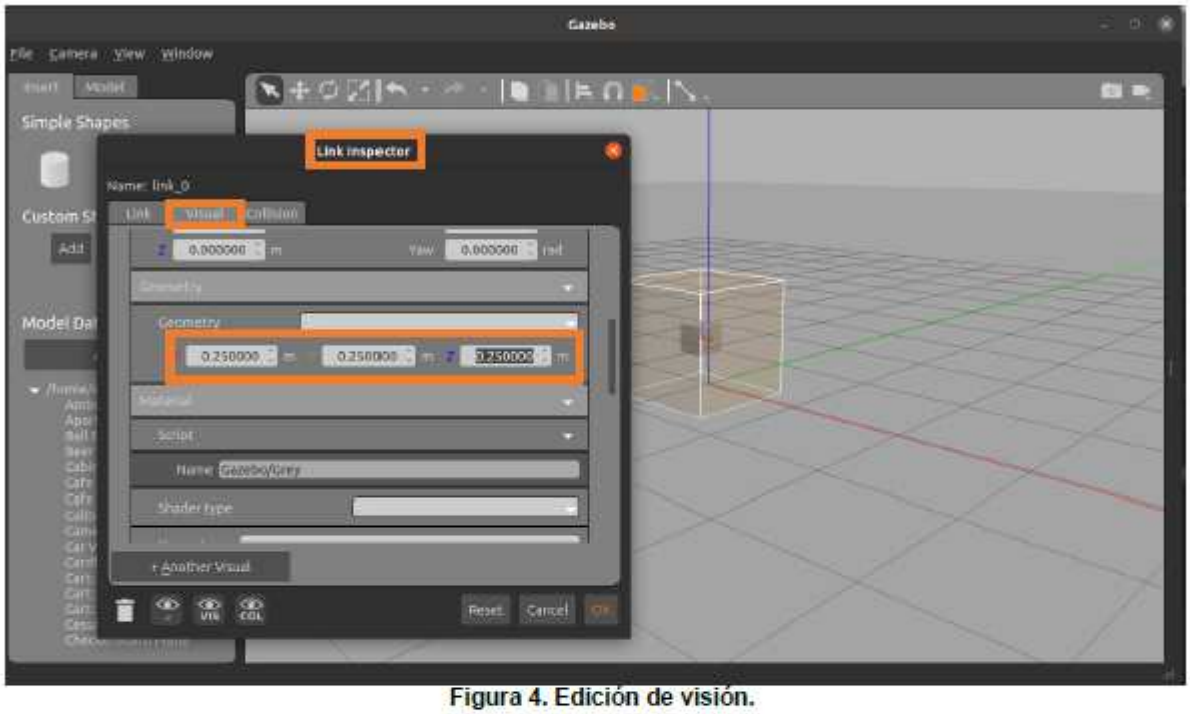


Figura 4. Edición de visión.

Para evitar el problema de la colisión en el caso de la plataforma robótica móvil, con el botón izquierdo del ratón sobre el submenú de collision, dimensionamos en x, y, z como se hizo con el submenú visual, obteniendo una colisión al nivel dimensional de la representación física. Como se muestra en la Figura 5.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 25, pp. 312 - 330.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

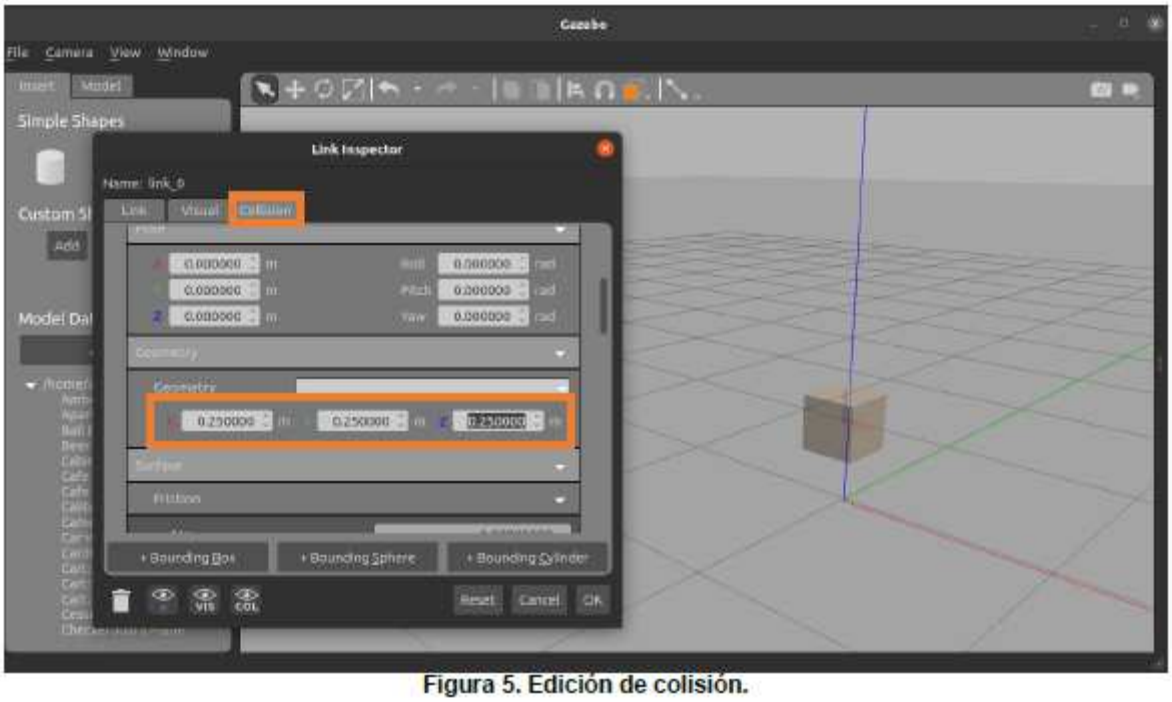


Figura 5. Edición de colisión.

A continuación, pasaremos al menú *Link* (que representa características principales de nuestra pieza). Podemos encontrar algunos apartados relacionados con fuerzas físicas que afectaran en la simulación, por ejemplo, la fuerza de gravedad o colisiones. Como se muestra en la Figura 6.

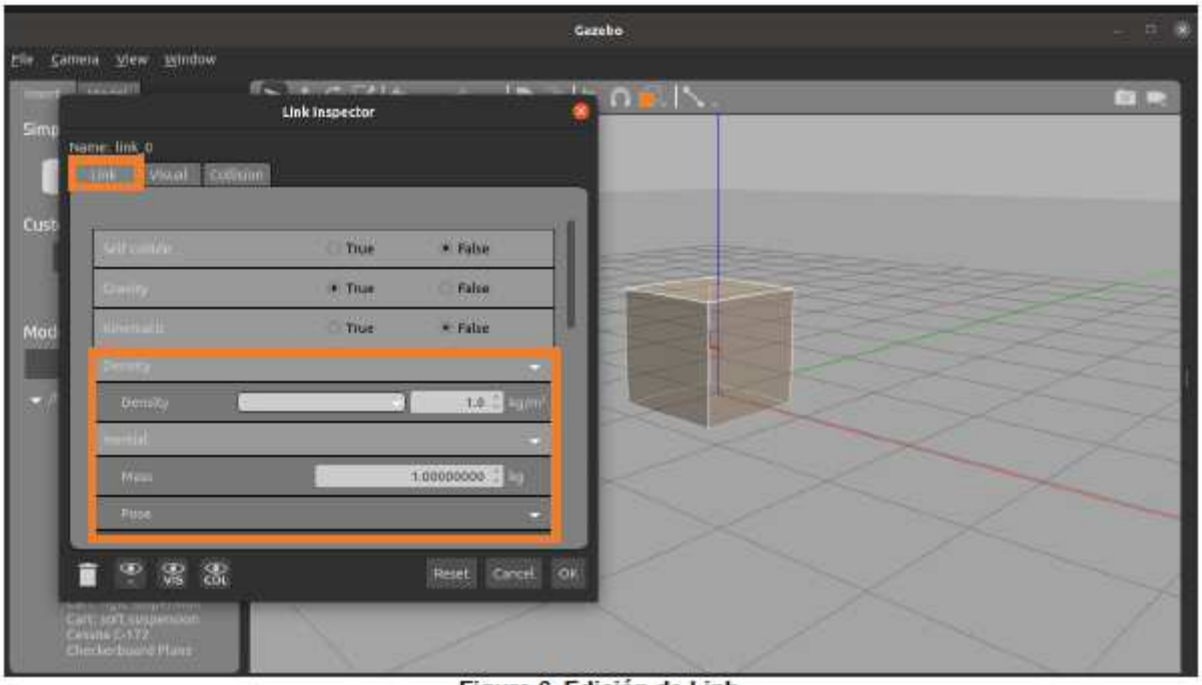


Figura 6. Edición de Link.

También se puede seleccionar el material de nuestro chasis (los cuales ya se encuentran dentro de Gazebo), incluso determinar la masa o posición respecto al sistema de posicionamiento global. Como se muestra en la Figura 7.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 25, pp. 312 - 330.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

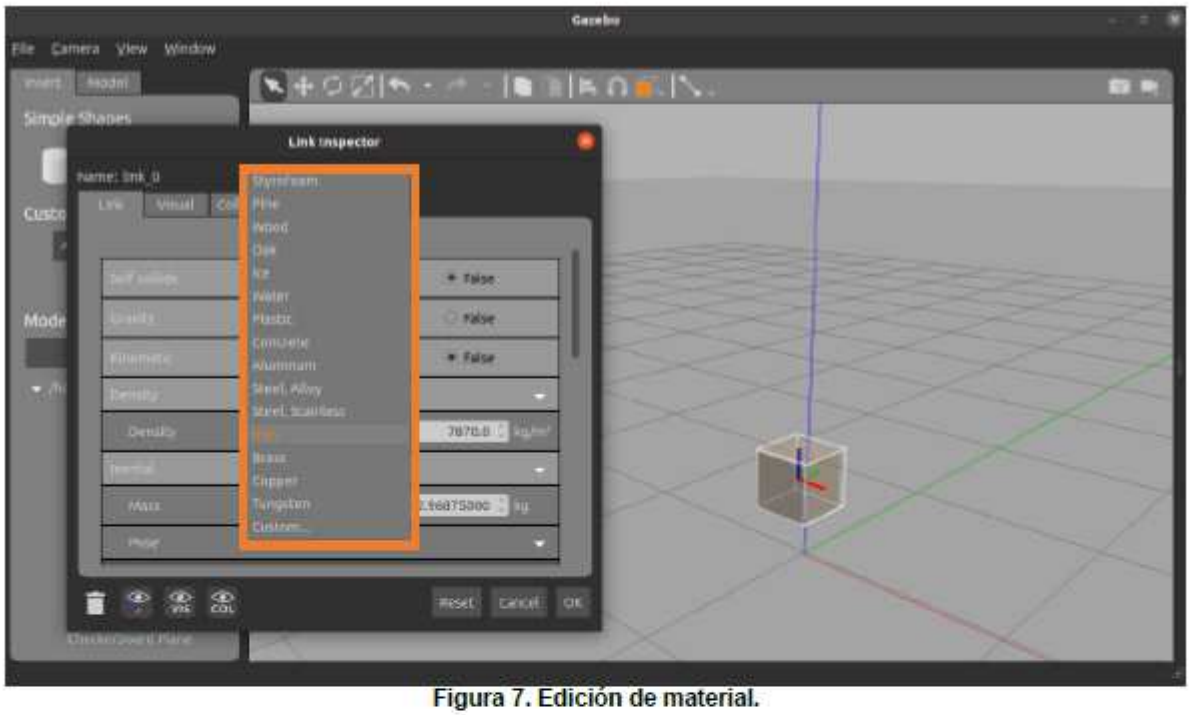


Figura 7. Edición de material.

Con el chasis editado pasaremos a la edición de las ruedas. Colocamos un prisma circular para comenzar con la edición, colocando el prisma circular en el espacio de trabajo. Con botón derecho comenzaremos a editar en *open link inspector*. Como se muestra en la Figura 8.

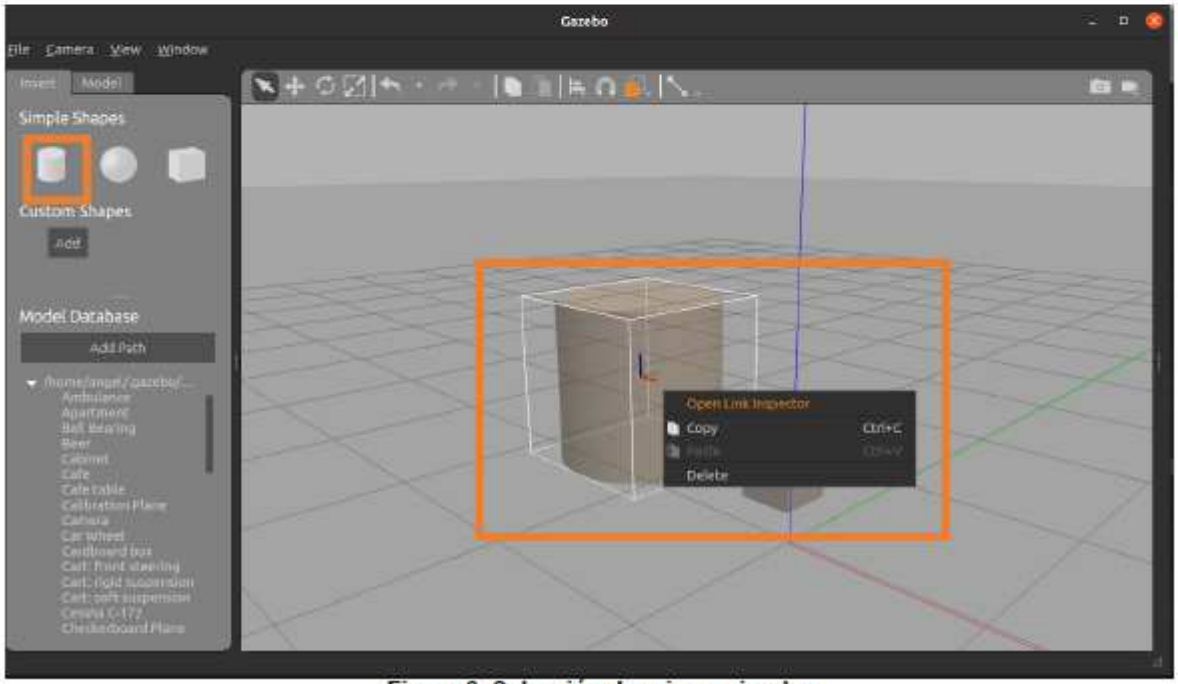


Figura 8. Selección de prisma circular.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 25, pp. 312 - 330.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

En el caso del prisma circular, en el sub menú de *visual* generamos la rueda necesitamos rotar el prisma en el eje Y 90 grados mediante el ángulo roll, sin embargo. Antes de continuar debemos especificar que Gazebo trabaja en radianes por lo cual colocaremos un valor de 1.5757 en el ángulo. Como se muestra en la Figura 9.

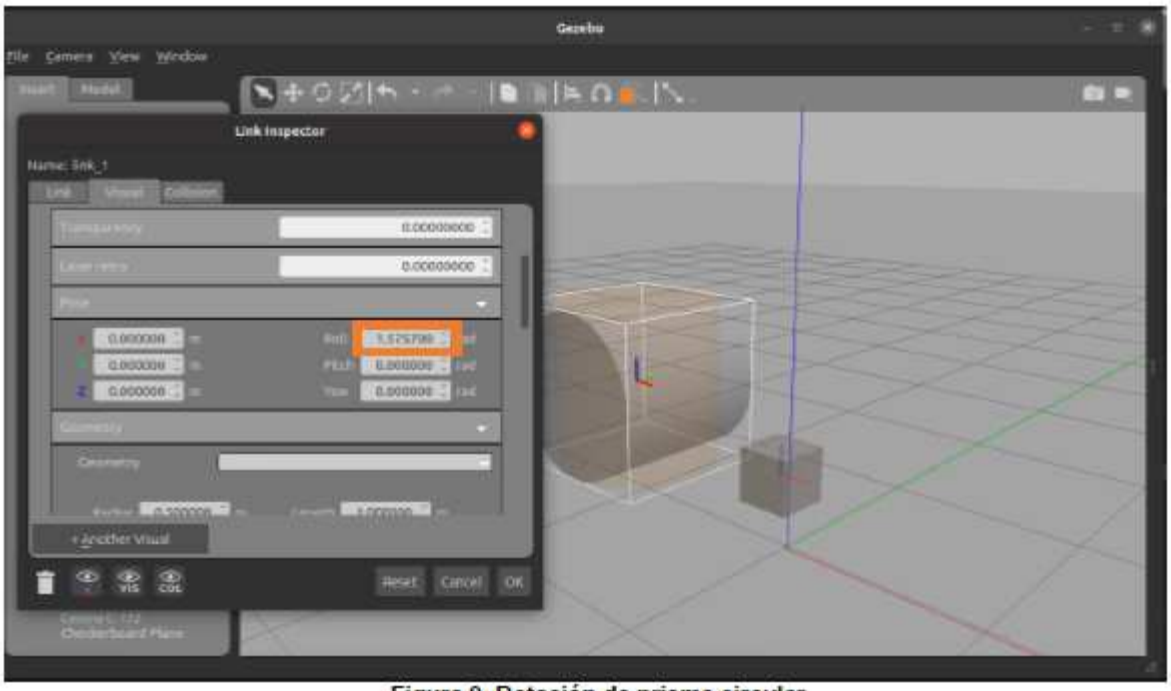


Figura 9. Rotación de prisma circular.

También se ajustará a las dimensiones propuestas para las llantas. En el caso del prisma circular se presentarán dos valores: radius y lenght. Los cuales son editados corresponden al radio y ancho de la rueda. Como se muestra en la Figura 10.

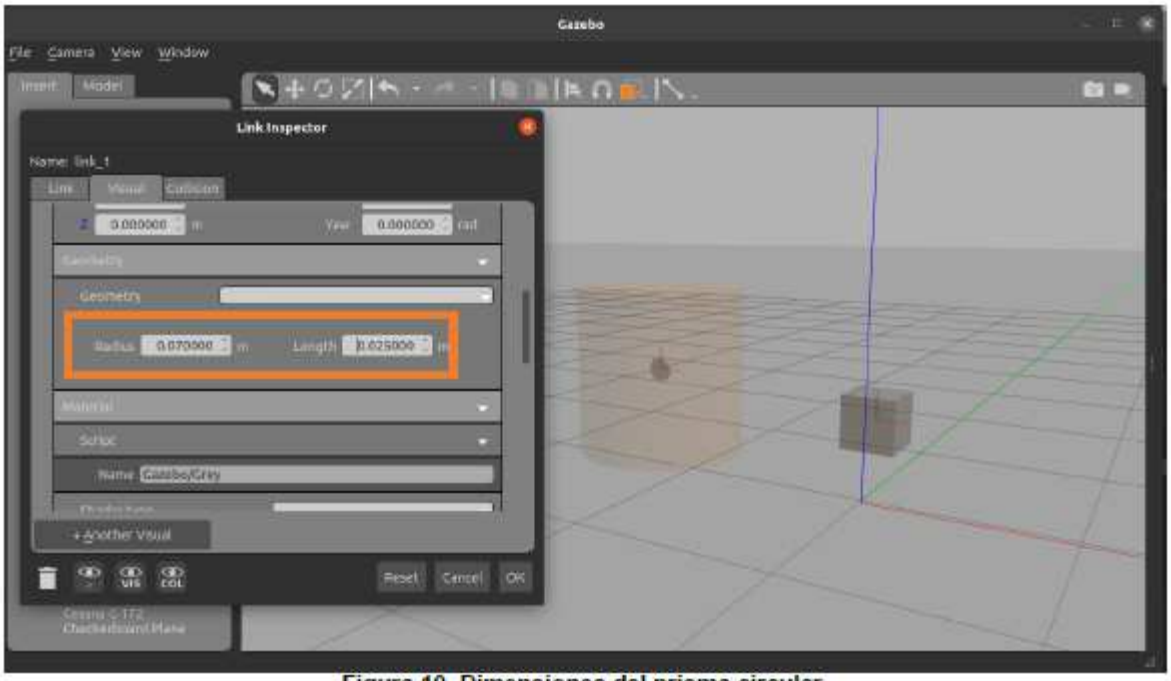


Figura 10. Dimensiones del prisma circular.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 25, pp. 312 - 330.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

En el caso de la plataforma móvil, se propone usar dos ruedas motrices con las mismas dimensiones, estas pueden colocarse con los comandos “ctrl c” y “ctrl v” usando la rueda que se editó anteriormente. También se inserta una esfera en la cual se editará de la misma forma en que fueron editados los prismas anteriormente explicados. Como se muestra en la Figura 11.

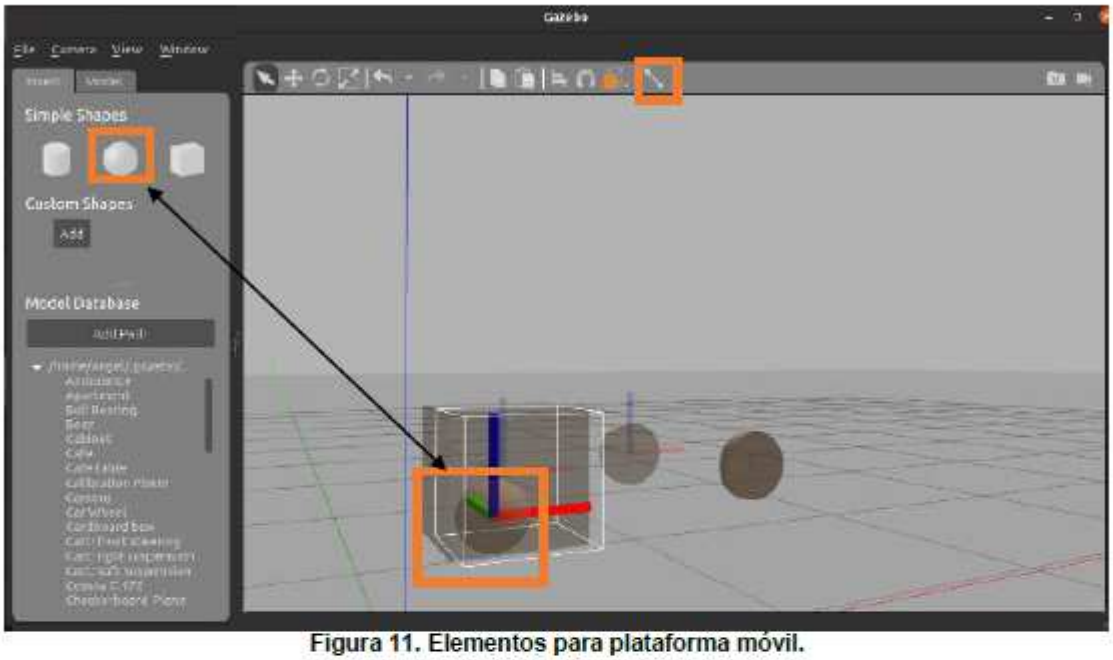


Figura 11. Elementos para plataforma móvil.

El siguiente paso es crear las articulaciones entre los 4 elementos que conformarán la plataforma. Para realizarlo seleccionamos *créate joint*. Como se muestra en la Figura 11. El cual encontraremos en la parte superior central, al seleccionarlo se desplegará el menú. Como se muestra en la Figura 12. En este se seleccionan los elementos que conformarán la articulación y relación de posición (padre-hijo). Seleccionando en *parent* (padre) el chasis o la referencia y como *chid* (hijo) el referido. La llanta en este menú se puede posicionar en alguna parte especifica del componente designado como padre (el chasis) y referenciado a partir de los ejes del elemento seleccionado como padre. También se elige el tipo de articulación en función de lo que realizará el elemento (en este caso es una llanta por lo que el tipo de articulación es una revoluta), en el caso de la esfera y frontal solo se coloca una posición central para mantener el equilibrio.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 25, pp. 312 - 330.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Figura 12. Tipos y configuración de articulaciones.

Con las articulaciones definidas para la plataforma robótica móvil, el siguiente paso es colocar los *plugins*. Los *plugins* de Gazebo (pertenecientes al paquete de Gazebo plugins) son complementos que se añaden a los modelos realizados o integrados, proporcionando funciones y/o sensores, lo que en ROS equivalen a *topics* que presentaran información relevante sobre la simulación del robot. Estos *plugins* se añaden a la descripción URDF del robot, permite exportar los sensores que se pretende utilizar. En el caso de la plataforma robótica móvil propuesta en este artículo, se usa una cámara y un LiDAR, los cuales se colocan en la plataforma con el mismo procedimiento de posicionamiento definido para localizar las articulaciones. Realizado esto se guarda la plataforma con el nombre deseado utilizando *save as* en la parte superior izquierda y en la parte superior se dará clic en salir del modelo *exit model*, lo que nos llevará al entorno de trabajo. Como se ilustro en la Figura 1, donde será posible visualizar el modelo de la plataforma móvil. Como se muestra en la Figura 13.

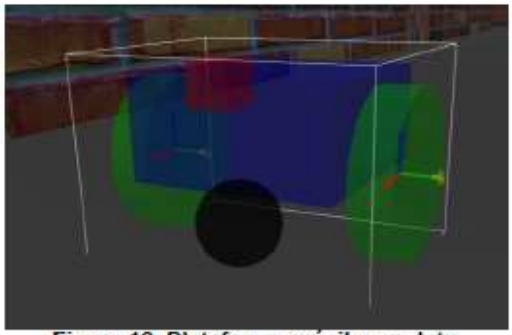


Figura 13. Plataforma móvil completa.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 25, pp. 312 - 330.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Una vez que la plataforma se encuentra instrumentada, el siguiente paso es generar las restricciones físicas (estas son las características que presentara la plataforma robótica móvil dentro de la simulación), como la posición de los centros de masa en el menú *Force*. Para la plataforma robótica móvil colocamos los centros de masa en las posiciones (0,0) de nuestros ejes coordenados de cada uno de elementos que la componen, ofreciendo estabilidad. El torque se aplica directamente sobre las articulaciones (haciendo el papel de los motores que integrarían a la plataforma para su desplazamiento), se mantiene con valores de 0 Newton-Metro. Es importante reconocer que estos valores son un parámetro que puede modificarse en el desarrollo de la simulación, ayudando a determinar los torques o fuerzas necesarios para el funcionamiento de la plataforma robótica móvil. Para el caso de las fuerzas se mantienen valores de 0 Newton para probar en el desarrollo de la simulación. Como se muestra en la Figura 14.

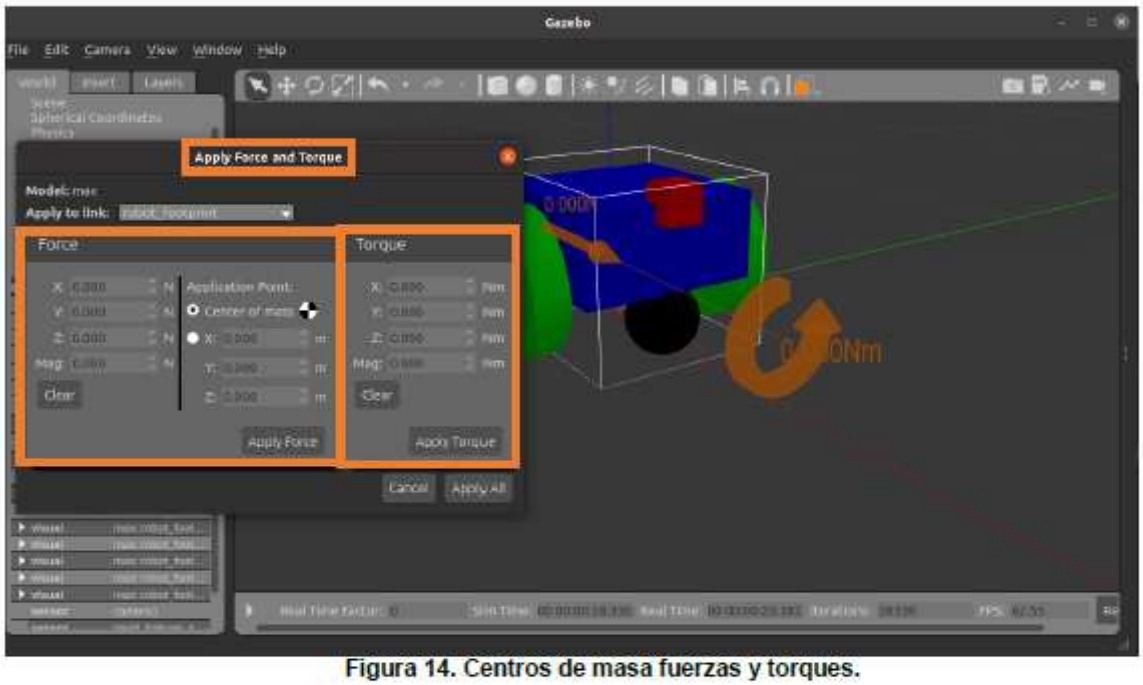


Figura 14. Centros de masa fuerzas y torques.

Con ayuda del botón derecho sobre la plataforma y seleccionando centros de masa podemos visualizar las posiciones de los centros de masa seleccionados. Como se muestra en la Figura 15.

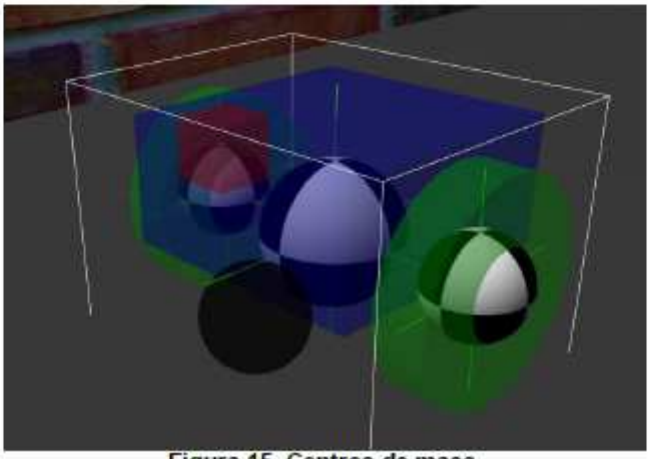


Figura 15. Centros de masa.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 25, pp. 312 - 330.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

El siguiente paso es crear un entorno de navegación para la plataforma robótica móvil. En menú *Edit,* en la parte superior izquierda y seleccionamos *building editor*. Se despliega una imagen. Como se muestra en a Figura 16. La parte superior funciona como pizarra donde se puede hacer un croquis de lo que se desea construir (2D). En la parte inferior se muestra un modelo de dibujo 3D, mientras de lado izquierdo es posible seleccionar colores y texturas, también puertas o ventanas según sea el propósito del diseñador. En el caso del entorno de navegación de la plataforma móvil se realiza una estructura de 22m x 5m, se coloca una textura de tabiques y se colocan unas escaleras.

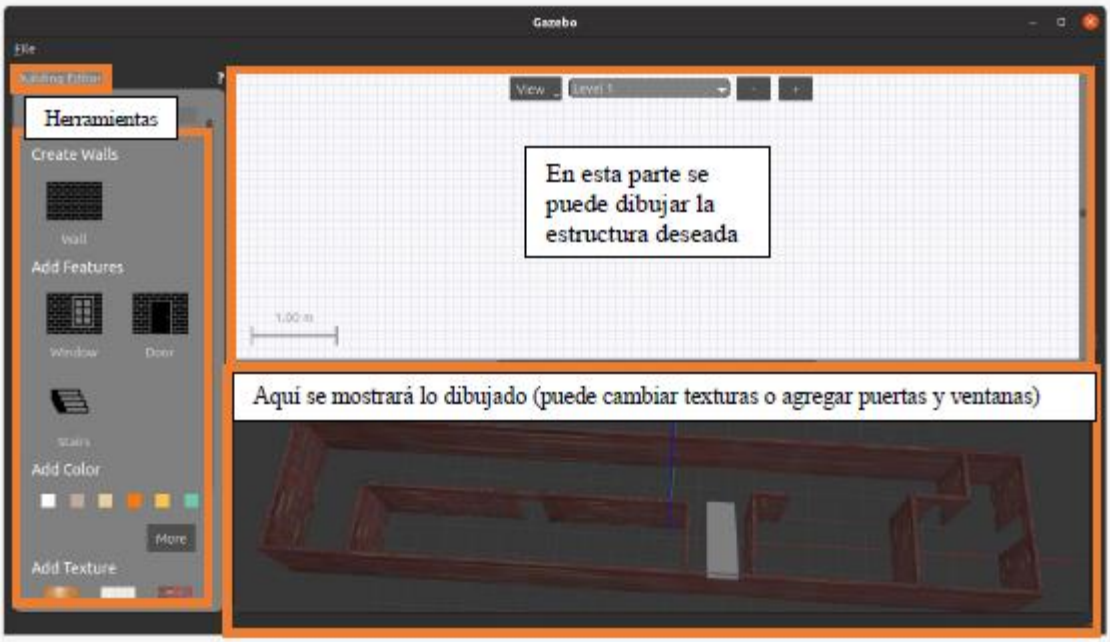


Figura 16. Building editor.

Para regresar al espacio de trabajo en la parte superior izquierda guardaremos el espacio creado con *save Building*. Para salir del espacio de edición, pulsaremos *exit Building* en el menú *file* encontrado en la parte superior izquierda. Volveremos al espacio. Como se muestra en la Figura 1, podremos ver la plataforma móvil dentro del entorno que se desarrolló. Como se muestra en la Figura 17.

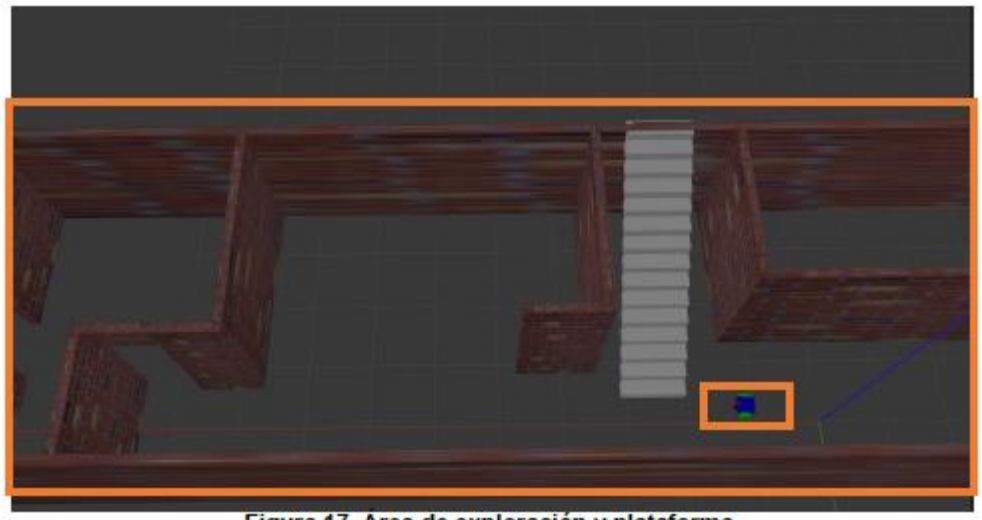


Figura 17. Area de exploración y plataforma.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 25, pp. 312 - 330.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

2.3 Instrumentación de la plataforma robótica mediante Rviz

La información de los datos registrados por los sensores es fundamental para las aplicaciones de una plataforma robótica móvil, una forma de visualizar la adquisición de datos de los sensores es con el uso de interfaces. En este trabajo se utiliza la interfaz de visualización Rviz, es un entorno de visualización 3D dentro de ROS que permite ver en una misma pantalla uno o más modelos de robots, y los datos de sensores en tres dimensiones, [12]. Es una herramienta de visualización 3D para ROS, permite al usuario ver el modelo de robot simulado, registra los datos de los sensores del robot y reproduce los datos registrados [14]. Para poder ejecutar Rviz utilizaremos el comando *Ctrl + Alt + t,* se abre una terminal con ayuda del comando *(rviz run run)* abrimos Rviz. Abre un espacio vacío para encontrar los tópicos que se encuentran funcionando, seleccionaremos de lado izquierdo en la parte media sobre el botón *add*. Para visualizar las imágenes adquiridas por la cámara, se selecciona el tópico *camera* en la parte inferior izquierda. Como se muestra de la Figura 18.

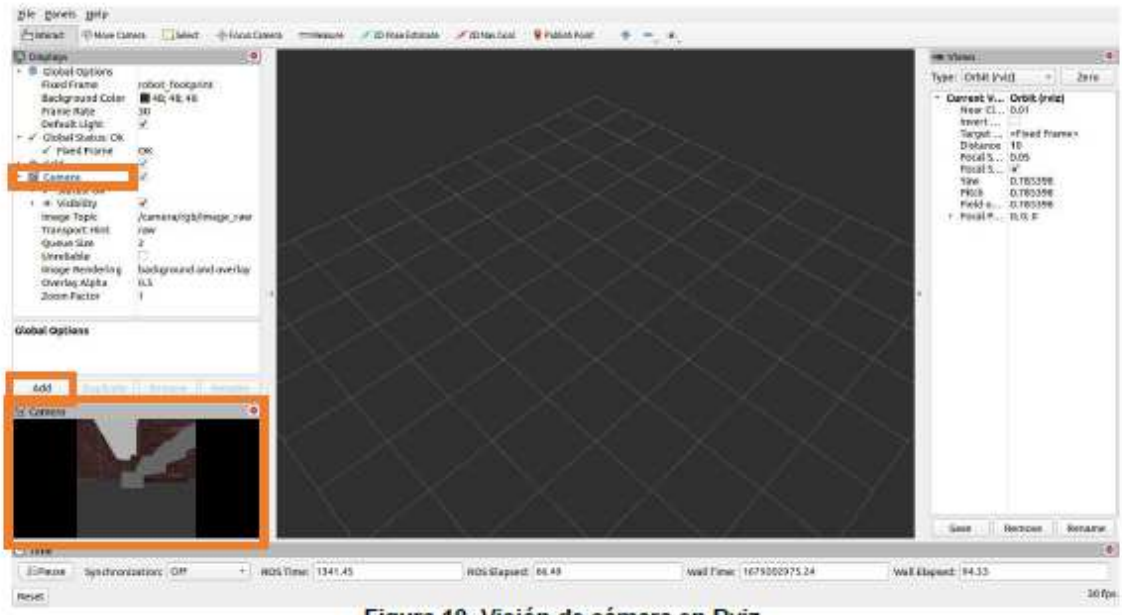


Figura 18. Visión de cámara en Rviz.

Dentro de *Rviz* volveremos a seleccionar *add* para agregar la posición del robot. Utilizando *Axes*, el cual agregara un sistema de referencia que representa la posición de la plataforma robótica móvil. Como se muestra en la Figura 19.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 25, pp. 312 - 330.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

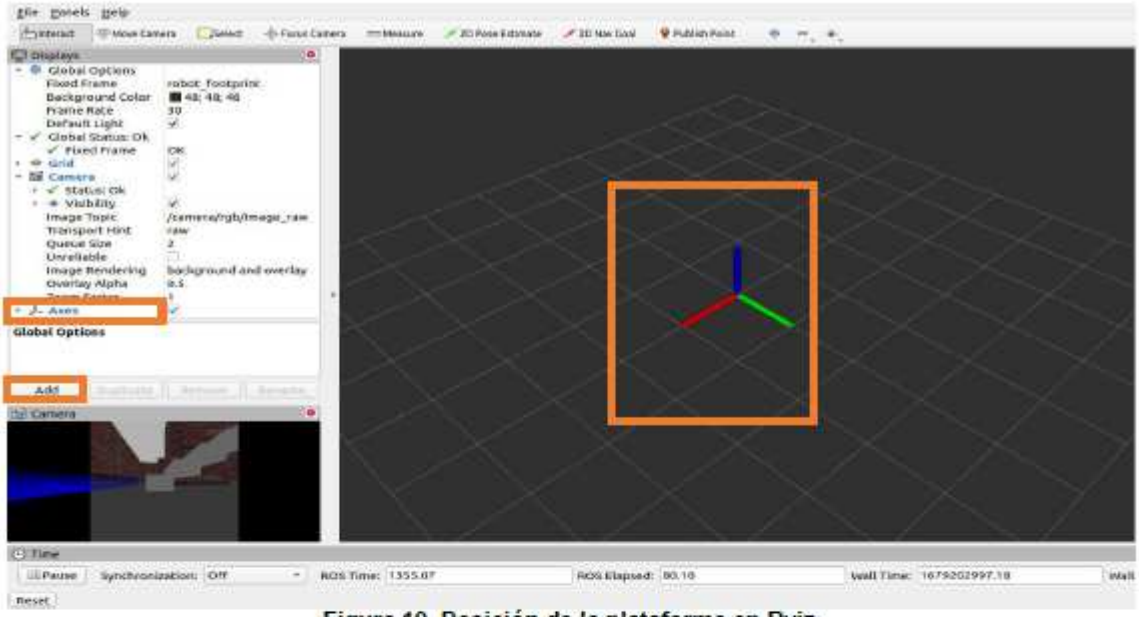


Figura 19. Posición de la plataforma en Rviz.

A continuación, se agrega un nuevo *tópico* para visualizar la adquisición del sensor LiDAR, dentro de Rviz volveremos utilizar *add* para seleccionar *LaserScan* con el tópico el tópico *scan* este tópico permite visualizar en Rviz como se está comporta la adquisición de datos de LiDAR. Como se muestra en la Figura 20.

Figura 20. Adquisición de LiDAR en Rviz

Algunas consideraciones adicionales para aproximar la simulación a un entorno real, son las restricciones físicas como la gravedad o un campo magnético entre otros, en este trabajo solo mantendremos la gravedad como una restricción. Como se muestra en la Figura 21.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 25, pp. 312 - 330.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

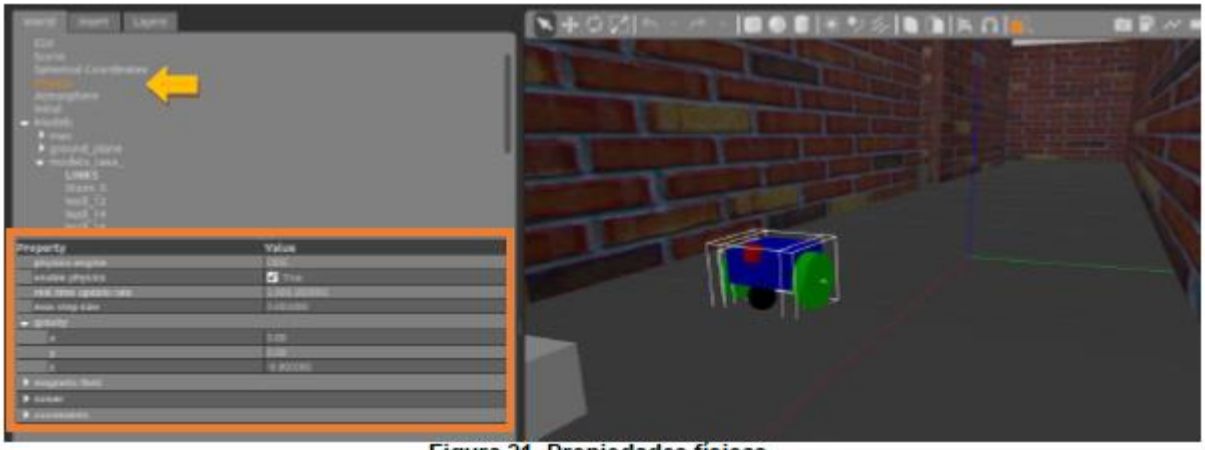


Figura 21. Propiedades fisicas.

ROS permite generar una simulación con variables ambientales como presión atmosférica, temperatura y densidad, estas propiedades pueden ser útiles para evaluar el desempeño del robot en distintas condiciones. Como se muestra en la Figura 22.

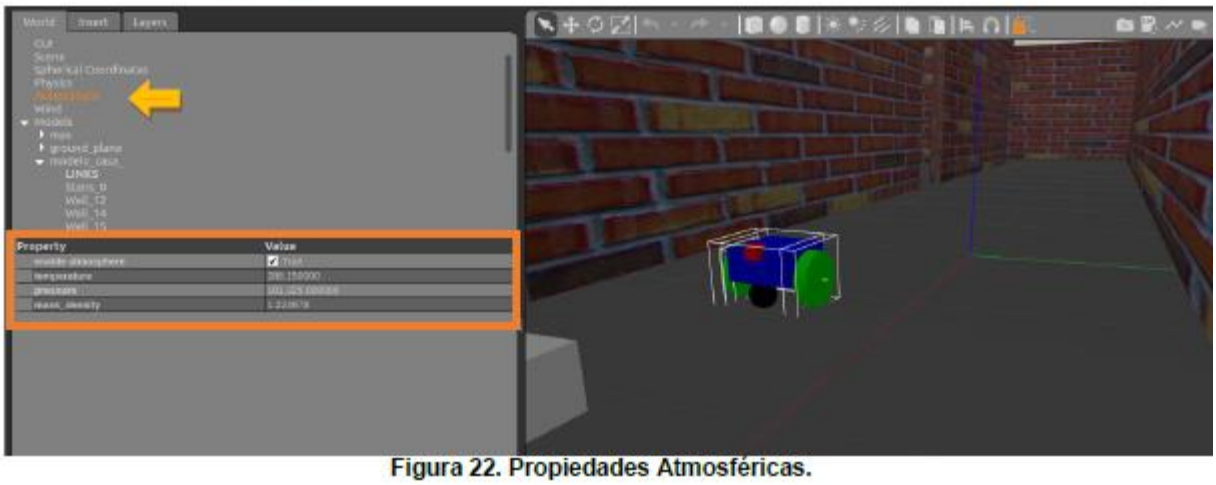


Figura 22. Propiedades Atmosféricas.

Hasta este punto se ha creado una plataforma robótica móvil, se ha instrumentado y creado un ambiente virtual. Para dotar al robot su capacidad de desplazamiento dentro de este ambiente, se deben añadir propiedades inerciales a las ruedas del robot. En Gazebo, de lado derecho se pueden encontrar las articulaciones, se puede asignar torque y velocidad. En este trabajo propone una velocidad de 1 m/s para ambas ruedas. La interfaz gráfica ofrece la posibilidad de pausar o detener la simulación (velocidades o restricciones explicados anteriormente) y reiniciar la simulación en la parte inferior izquierda. Como se muestra en la Figura 23. También ofrece la posibilidad de manipular directamente todos los objetos dentro del entorno de trabajo, modificar las posiciones iniciales o durante la ejecución para generar perturbaciones en posición o evaluar el funcionamiento bajo alguna condición especifica definida por diseñador.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 25, pp. 312 - 330.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

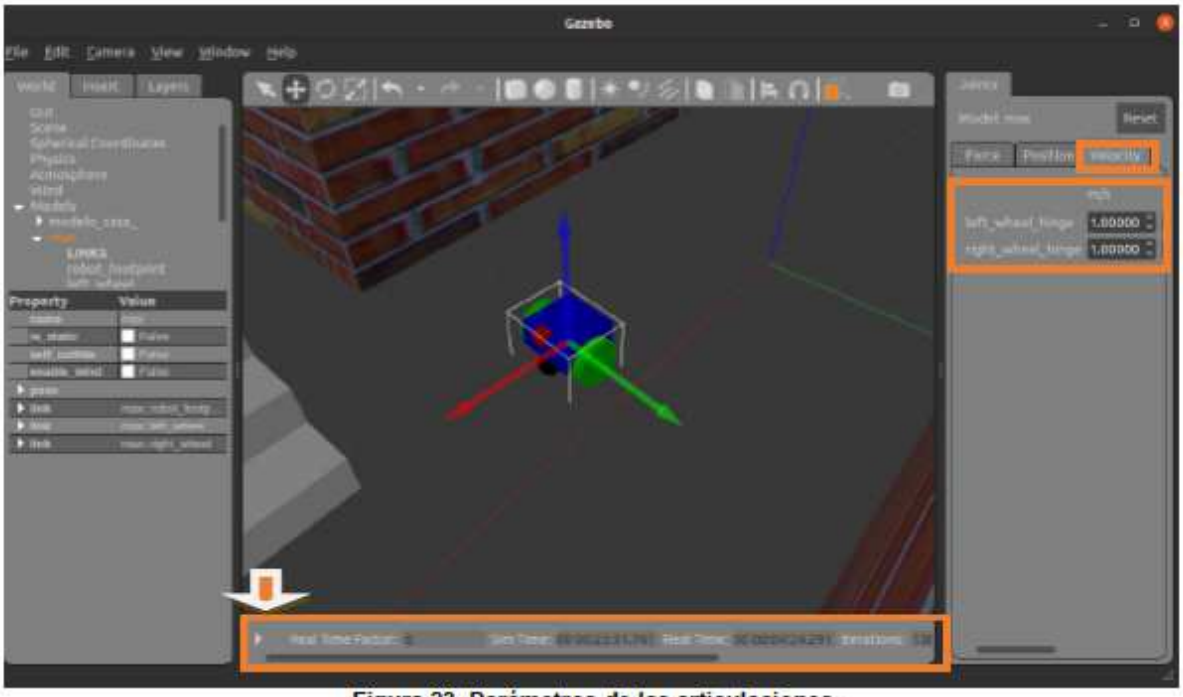


Figura 23. Parámetros de las articulaciones.

Se puede visualizar el desplazamiento de la plataforma en *Gazebo*, mientras *Rviz* muestra el cambio en la adquisición de datos por parte de los sensores respecto al avance de la plataforma, la visión de la cámara y el cambio en el láser respecto a su recorrido por el entorno. Como se muestra en la Figura 24.

Figura 24. Parámetros de las articulaciones.

Dentro del ROS, una forma de validar la comunicación entre nodos y visualizar la interacción de los tópicos con una visualización grafica utilizando el siguiente comando *"rosrun rqt_console"*. Como se muestra en la Figura 25. Donde se describe la comunicación y dirección entre *nodos*, permite al usuario saber si cuenta con el algoritmo completo y determinar alguna posible falla en la comunicación o programación. Puede verificar la ejecución de los nodos con *Gazebo*. Con esta información podemos deducir que el funcionamiento de esta simulación es adecuado.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 25, pp. 312 - 330.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

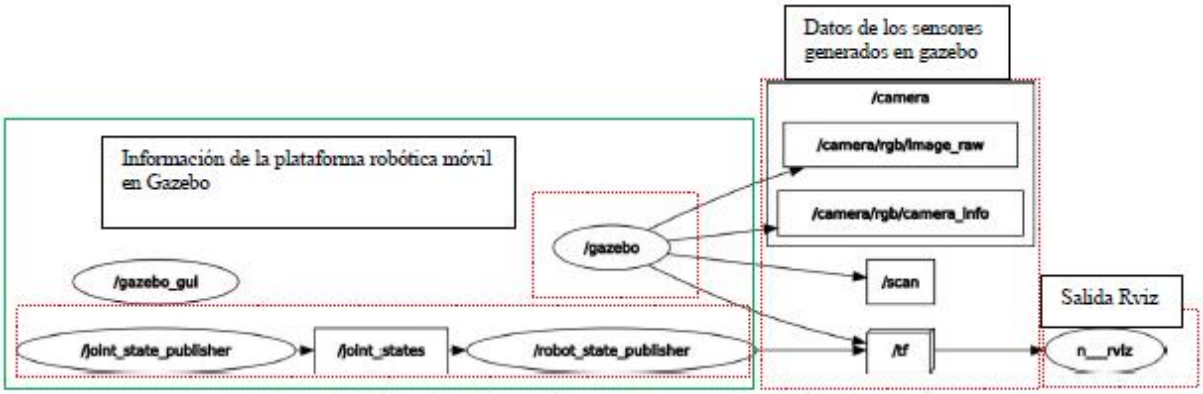


Figura 25. Descripción gráfica de la ejecución de la simulación.

Una aplicación común para las plataformas robóticas móviles es el SLAM, La localización y mapeo simultáneos es una técnica utilizada con el fin de hacer un mapa, actualizarlo y estimar la posición del robot a partir de los sensores abordo sobre la plataforma robótica [15]. El algoritmo SLAM es una combinación de mapeo, detección, modelado cinemático, cámaras múltiples, movimiento objetos y exploración.

En este trabajo el algoritmo SLAM utilizado como prueba es Hector SLAM basado en escáner láser en tiempo real, Héctor SLAM utiliza un escáner láser para obtener mediciones de distancia a lo largo de un plano, y utiliza estas mediciones para construir un mapa de un entorno desconocido. El algoritmo también maneja información para estimar su posición y orientación en el mapa. En Héctor SLAMse basa en un modelo de ocupación de rejilla (OGM) para representar el mapa, lo que permite una representación detallada y precisa del entorno, este tipo de algoritmo puede visualizarse en Rviz, [16][17]. Como se muestra en la Figura 26.

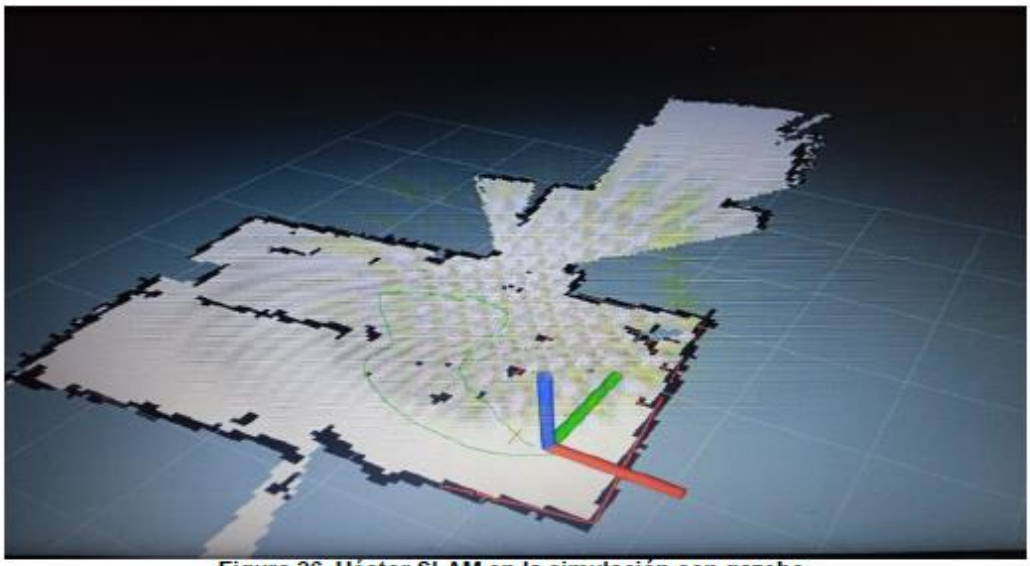


Figura 26. Héctor SLAM en la simulación con gazebo.

3. Resultados

A continuación, se muestra la representación gráfica de la interacción entre nodos de la simulación sensores y ejecución de sistema Héctor SLAM. Para evaluar los requerimientos computacionales mínimos necesarios para su ejecución, mientras realiza una tarea de localización y mapeo en tiempo real, se valida el funcionamiento de la simulación. Como se muestra en la Figura 27.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 25, pp. 312 - 330.
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

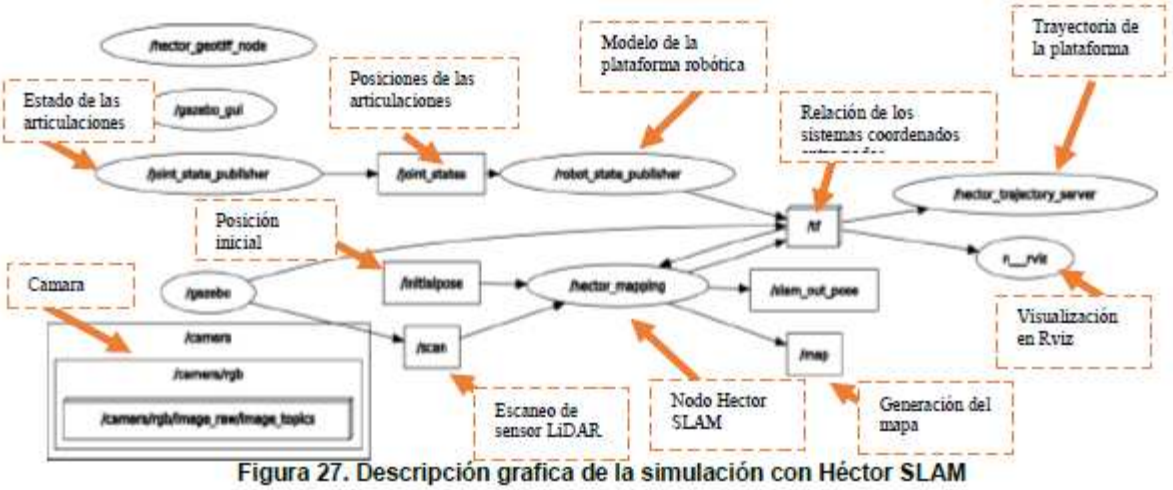


Figura 27. Descripción grafica de la simulación con Héctor SLAM

La simulación se realizó en una computadora con las siguientes características; Intel Core i5, de 3GHz y 12 GB de RAM se monitoreo el uso del procesador con ayuda de la herramienta *Monitor de sistema*. Esta se encuentra en el menú de *Ubuntu* permite visualizar el uso del procesador en tiempo real, se puede observar que se encuentran trabajando a más del 90%. Como se muestra en la Figura 28. Para el presente trabajo se cumple con los recursos mínimos, sin embargo, se desea usar para futuras aplicaciones de SLAM es importante considerar que con el uso de un mayor número de sensores o sistemas más robustos. Se recomienda usar un equipo de cómputo con mejores características computacionales como Intel Core i7, de 3.6GHz y 16 GB de RAM como mínimo.

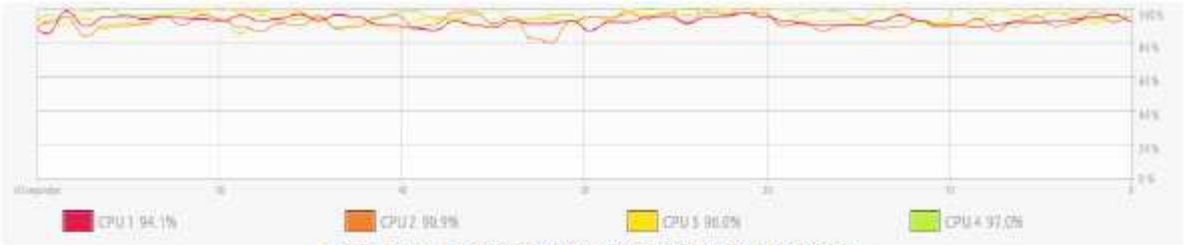


Figura 28. Costos computacionales del sistema.

4. Conclusiones

En este trabajo se desarrollo una plataforma robótica móvil dentro de ROS, un frameworks de uso libre de gran importancia en el desarrollo de la robótica, utilizando el simulador *Gazebo*. Las simulaciones tienen múltiples ventajas en el campo de la robótica, permite la creación de entornos virtuales en los que se pueden probar y mejorar los sistemas o prototipos antes de su implementación. Entre las principales ventajas se encuentran: la reducción de costos, recursos y tiempos de desarrollo, la posibilidad de experimentar con diferentes configuraciones y escenarios sin arriesgar la seguridad de personas o equipos. También ofrecen la capacidad de analizar y visualizar datos de manera más precisa y detallada. En el desarrollo de este trabajo se especificaron los pasos para la creación de una plataforma robótica de tracción diferencial, la cual servirá de guía para generar plataformas más elaboradas ya que el principio de diseño que se muestra detalladamente, se explica cómo crear las articulaciones e implementar la instrumentación. Se validó la comunicación de la simulación dentro de ros para garantizar el funcionamiento de la simulación con una cámara y un LiDAR que ofrece la comunidad de *Gazebo*. Se evaluó el desempeño en una aplicación de localización y mapeo simultaneo con Héctor SLAM. Se determinaron los recursos computacionales mínimos para la implementación de un SLAM en un entorno real, aun que el resultado de la simulación fue satisfactorio

el recurso computacional con el que se realizó la simulación se mostraba al límite para una aplicación futura, por lo que se recomendó mejorar el recurso computacional.

Referencias

[1] Executive Summary World Robotics 2020 Service Robots.
https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_2020_Service_Robots.pdf

[2] Mahadevaiah B, Mahadevappa S, "Mapping of an Unknown Indoor Environment Using 2D –Lidar and ROS for mobile Robot Navigation" Advanced Science and Technology, IJAST, Vol 29, pp 14338-14345, 2020.

[3] Gómez A, "Fusión de Sensores Visuales e Inerciales para Navegación Autónoma de Cuatrirotores" Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Zacatenco) 2022.

[4] Pramod S, Mangesh M, "ROS based SLAM implementation for Autonomous navigation using Turtlebot" ITM Web of Conferences, ICACC, 2020

[5] Ramirez A, Sandoval X, "Comparison of different techniques of 2D simultaneous localization and mapping for a mobile robot by using ROS" International Engineering congress, CONiiN, Queretaro, 2020

[6] Carlos G., "PLATAFORMA BASADA EN LA INTEGRACIÓN DE MATLAB® Y ROS PARA LA DOCENCIA DE ROBÓTICA DE SERVICIO" Jornadas de automática XXXVIII, Oviedo,2017

[7] Avila M, Baray R, "SIMULACION Y EMULACION ROBOTICA EN MEDIOS ALTERNOS" Congreso internacional de ingeniería electrónica, Chihuahua, 2018.

[8] Cañas J, Matellan V, "PROGRAMACION DE ROBOTS MOVILES" Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Valencia, 2006.

[9] Andrade J., Romero H., Rodríguez J," Diseño y desarrollo de un robot aéreo para la inspección de colectores de saneamiento" En XL Jornadas de Automática, Galicia, 2019.

[10] Cañas, "Entorno Docente Universitario para ña Programación de Robots" Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 2018.

[11] Tutoriales Ros [Online]https://wiki.ros.org/ROS/Tutorials

[12] Robot Operating System [Online] https://www.ros.org/

[13] Oña A, Rosero,X "MobileRobotics Plataform For Experiments Using Ros: Development of the Meta – Operating System" vive la ciencia, vol1, Ecuador, 2015.

[14] Cuevas C, "Ros-gazebo. una valiosa Herramienta de Vanguardia para el Desarrollo de la Robótica", Publ. investig., vol. 10, pp. 145–160, mar. 2016.

[15] Maksim F, "Comparison of Various SLAM Systems for Mobile Robot in an Indoor Environment", Conference: 9th IEEE International Conference on Intelligent System, Portugal, pp. 400-407 Nov. 2018.

[16] S. Nagla, "2D Hector SLAM of Indoor Mobile Robot using 2D Lidar," International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS), 2020, pp. 1-4, India, 2020.

[17] T. Sharma P., P. Sankalprajan, A. J. Muppidi and P. S. Pagala, "Analysis of Computational Need of 2D-SLAM Algorithms for Unmanned Ground Vehicle," 4th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), 2020, pp. 230-235, India, 2020

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 26, pp. 331 - 349
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Diseño Mecánico y Control de Movimiento de un Sistema Robótico para Grabado de Joyería

Galván Pérez Daniel[1]✉, Beltrán Carbajal Francisco[2], Velázquez Contreras Jesús Benjamín[2], Albarrán Maldonado Alma Luz[2], Rivas Cambero Iván de Jesús[1], Gayou Hernández Emmanuel[2]

[1]Departamento de Posgrado, Universidad Politécnica de Tulancingo, Tulancingo de Bravo 43629, Hidalgo, México.
[2]Departamento de Energía, Unidad Azcapotzalco, Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México 02200, México.
✉ daniel.galvan2115007@upt.edu.mx

Resumen

El grabado es una técnica de personalización popular y versátil que se utiliza para crear diseños únicos en piezas de joyería. En este trabajo, se presenta el diseño mecánico y el control de movimiento de un sistema robótico para el grabado de joyería con tecnología láser. En la etapa de diseño mecánico, se desarrollaron dos sistemas de transmisión de movimiento que fueron integrados en una máquina compacta y ligera de tres grados de libertad de arquitectura cartesiana. Este diseño proporciona un movimiento suave y uniforme y asegura una alta calidad de grabado. Posteriormente, se propone un esquema de control de movimiento basado en el modelo matemático del sistema robótico y una ley de control lineal con una acción de control de tipo Proporcional-Derivativo (PD). El esquema de control propuesto se diseñó para controlar el movimiento de los actuadores que desplazan la herramienta de grabado, con el objetivo de garantizar una alta precisión en el proceso. Se presentan casos de estudio que validan el desempeño del esquema propuesto en simulaciones de seguimiento de perfiles de movimiento para grabado de joyería de geometría plana. Se muestra que el esquema de control diseñado proporciona alta exactitud en el posicionamiento y movimiento de la herramienta de grabado, lo que se traduce en excelente precisión y una alta calidad de grabado en las piezas de joyería.

Palabras Clave: Control de Movimiento, Grabado de Joyería, Robot Cartesiano, Tecnología Láser.

1. Introducción

El grabado es una disciplina artística admirada durante el transcurso de la historia. Consiste en plasmar letras, imágenes y diseños sobre superficies rígidas [1]. En la técnica del grabado, se han utilizado distintos tipos de materiales para representar el arte, permitiendo a los artesanos expresar su creatividad e ingenio en una amplia gama de soportes. Entre los materiales empleados para el grabado se encuentran la madera, el plástico y el aluminio. Este último, un metal común y económico, ha sido ampliamente utilizado en matrices de grabado debido a su maleabilidad, que facilita el empleo de técnicas ancestrales y su adaptabilidad a las innovaciones tecnológicas [2]. A lo largo del tiempo, los artesanos han desarrollado y perfeccionado diversas maneras de realizar el grabado y el mecanizado en diferentes tipos de materiales, tanto de forma manual como mediante la utilización de maquinaria semiautomática [3, 4]. Actualmente, el grabado abarca una rica diversidad de métodos y técnicas, algunas de las cuales se remontan a siglos atrás, pero que todavía se siguen empleando en la práctica artesanal contemporánea [1]. Esta combinación de tradición y modernidad ha enriquecido el campo del grabado, permitiendo a los artesanos explorar nuevas formas de expresión y experimentar con materiales y técnicas que siguen siendo relevantes y versátiles en el arte del grabado actual [5]. En el ámbito del grabado en joyería, las técnicas y métodos varían según el material y el diseño, y pueden abarcar desde la talla y el cincelado manuales hasta el uso de robots y la tecnología láser [6, 7].

Desde tiempos inmemoriales, la joyería ha sido un medio artístico que el ser humano ha empleado para expresar su individualidad, estatus social y pertenencia cultural [8]. Entre las diversas técnicas utilizadas en la personalización y creación de diseños únicos en joyería, el grabado se ha consolidado como una práctica apreciada por su versatilidad. A pesar de ello, el proceso manual de grabado puede ser lento, costoso y en ocasiones no alcanzar la precisión y homogeneidad necesarias para un acabado de alta calidad [9]. Es en este escenario donde la tecnología láser surge como una solución eficaz y precisa para el grabado en joyería. El grabado láser es una técnica sumamente precisa que consiste en crear un surco en el material mediante un haz de luz concentrado [10, 11]. Este proceso ofrece ventajas considerables en términos de rentabilidad y calidad en el producto final en comparación con los métodos tradicionales. Uno de los beneficios más notables es la limpieza del proceso, ya que no se generan residuos de virutas en el material, mejorando así la calidad del producto [12]. La habilidad del láser para efectuar cortes y grabados con una precisión excepcional en materiales duros y resistentes, sin generar desperdicios, lo posiciona como una herramienta fundamental en la industria joyera [13, 14]. Gracias a esta tecnología, los diseñadores y artistas pueden elaborar patrones intrincados y detallados en una amplia variedad de materiales, que van desde metales preciosos hasta acrílicos, maderas y resinas.

El grabado láser ha mostrado un impacto significativo en la industria joyera, permitiendo que los diseñadores y fabricantes incorporen detalles y personalizaciones únicas en sus creaciones [15]. A pesar de los avances tecnológicos, la calidad del grabado láser puede variar considerablemente según el material utilizado y su interacción con el haz de luz concentrado. Los metales preciosos como el oro, la plata y el platino son apreciados en la joyería por su estética y resistencia a la corrosión. Sin embargo, debido a su alta reflectividad, estos metales pueden dificultar la absorción del láser, lo que a menudo requiere ajustes en la potencia y velocidad del mismo [16]. A pesar de estos retos, el grabado láser en oro y plata generalmente produce resultados precisos y nítidos, mientras que el platino, con su mayor densidad y dureza, presenta desafíos adicionales en el proceso de grabado [17]. Las aleaciones metálicas, que se utilizan comúnmente en la fabricación de joyas debido a su resistencia y durabilidad, también presentan retos únicos en el grabado láser. Cada aleación requiere ajustes específicos en el proceso de grabado para lograr resultados óptimos. Por ejemplo, el latón y el acero inoxidable generalmente ofrecen buenos resultados con el láser, mientras que el titanio requiere un proceso previo de anodizado para lograr un grabado de calidad [18]. El grabado láser en materiales translúcidos y transparentes, como lo son las gemas y los cristales, puede ser un proceso desafiante, ya que la luz del rayo láser tiende a atravesar el material en lugar de solamente ser absorbida [19]. Aunque el diamante puede ser grabado con láser debido a su alta conductividad térmica, es crucial tener precaución para evitar dañar la piedra. En cuanto a los materiales orgánicos, estos pueden proporcionar resultados detallados cuando se graban con láser, pero su sensibilidad al calor los hace propensos a quemarse o dañarse si no se ajusta correctamente la potencia y la velocidad del rayo láser [20].

La adopción de la tecnología láser en la industria de la joyería ha cambiado de manera radical el proceso de personalización y detalle que se tiene en las piezas, lo que ha llevado al abandono de algunos tratamientos convencionales, y en consecuencia, al ahorro de tiempo, esfuerzo y recursos. Uno de los aspectos más destacados es la sustitución del grabado químico, que implicaba la utilización de ácidos y productos corrosivos [21], por el grabado láser. Esta innovación ha simplificado enormemente el proceso, además de reducir los riesgos para la salud y el medio ambiente. En el pasado, el grabado mecánico era un enfoque común para marcar la superficie de los metales preciosos [22]. Sin embargo, este método era lento y exigía una gran habilidad por parte del artesano. Gracias al grabado con tecnología láser, este proceso se ha vuelto no invasivo y más rápido, evitando el desgaste de las herramientas y ofreciendo resultados de alta calidad. Otro aspecto que ha cambiado con la llegada del grabado láser es la preparación de la superficie del material. Antes era necesario pulir, lijar o aplicar recubrimientos especiales al objeto antes de comenzar el proceso de grabado [23]. Hoy en día, la tecnología láser permite trabajar directamente sobre la superficie sin necesidad de una preparación extensa, lo que ahorra tiempo y esfuerzo. La tecnología láser también ha dejado atrás el uso de plantillas físicas, que solían ser esenciales para guiar el proceso de grabado y garantizar resultados precisos [24]. Ahora, los diseños se crean digitalmente y se transfieren al láser, lo que proporciona una mayor precisión y flexibilidad. Por último, el grabado láser ha eliminado la necesidad de realizar tratamientos posteriores al proceso, como pulir o limpiar la pieza [25]. El resultado obtenido es totalmente limpio y preciso, lo que reduce bastante el tiempo invertido y mejora la eficiencia del proceso en su totalidad.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 26, pp. 331 - 349
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

La producción de joyería ha evolucionado hacia niveles de sofisticación nunca antes vistos, brindando a los clientes piezas personalizadas y exclusivas que se ajustan a sus preferencias y gustos personales. La incorporación de máquinas de grabado láser en el proceso de fabricación de joyas ha sido un gran paso para la creación de productos de alta calidad y precisión [26]. Al emplear la tecnología láser de manera adecuada, como se vio previamente, se puede prescindir de otros tratamientos durante todo el proceso de producción de piezas de joyería. Considerando los métodos tradicionales de esmerilado de polvo de diamante y trazado de haz de iones, la velocidad del grabado láser es considerablemente rápida [27]. Los caracteres y gráficos editados a través de software pueden ser grabados directamente, con un impacto mínimo en el brillo y la pureza de las piezas a grabar, lo que se traduce en una alta calidad de grabado y una operación sencilla [28]. Las máquinas de grabado láser también son ideales para marcar de manera permanente y de forma resistente al desgaste superficies de joyas preciosas y delicadas, como anillos y collares, con mensajes personalizados, saludos y patrones exclusivos [28, 29]. Además, el láser puede grabar una amplia gama de materiales, como cobre, acero inoxidable, plata, oro, platino y titanio [30]. En función de este contexto, surge la propuesta innovadora y atractiva de implementar un sistema robótico para realizar este tipo de operaciones en el campo de la joyería. El diseño mecánico y el control de movimiento de un sistema robótico para el grabado de joyería representan una aportación interesante hacia esta industria. Al combinar la precisión y eficiencia de la tecnología láser con la versatilidad y manipulación que ofrece un sistema robótico, se puede permitir a los joyeros y diseñadores expandir sus horizontes creativos y ofrecer a sus clientes piezas únicas y sofisticadas, llevando el arte del grabado hacia nuevos niveles de perfección y belleza.

Existe una gran variedad de maquinaria para realizar operaciones de grabado con tecnología láser, en este sentido, se han identificado diferentes maquinas comerciales que ofrecen características variadas, a continuación la Tabla 1 presenta tres diferentes modelos de máquinas para grabado láser y sus principales características:

Tabla 1. Comparación de Características de Operación en Máquinas Comerciales de Grabado Láser.

Características	LW2 [31]	G20 [32]	WELASE [33]
Peso de la maquina	$60\ kg$	$121\ kg$	$42\ kg$
Potencia	$20\ W - 50\ W$	$20\ W$	$20\ W - 30\ W$
Velocidad	$10{,}000\ mm/s$	$300\ caracteres/s$	$1500\ mm/s$
Peso máximo soportado	$25\ kg$	–	$3\ kg$
Frecuencia	$2\ Khz - 200\ Khz$	$1.6\ Khz - 1000\ Khz$	$30\ Khz - 60\ Khz$
Temperatura	$10°C - 40°C$	$15°C - 35°C$	$10°C - 35°C$
Dimensiones	$600 \times 622 \times 722\ mm$	$45 \times 66 \times 63\ mm$	$450 \times 560 \times 610\ mm$
Consumo de energía	$800\ W$	$500\ W$	$800\ W$

El objetivo de este trabajo es presentar un sistema robótico para el grabado láser de piezas de joyería con alta precisión. El sistema está basado en una arquitectura cartesiana de tres grados de libertad y utiliza un esquema de control de movimiento basado en el modelo matemático del sistema y una ley de control lineal. Se presentan casos de estudio que validan la eficacia del esquema de control en el seguimiento de perfiles de movimiento del efector final del sistema robótico, demostrando con esto su capacidad para producir grabados de alta calidad en piezas de joyería con geometría bidimensional. El diseño mecánico del sistema robótico para el grabado láser de joyería propuesto ha considerado cuidadosamente factores clave como la gestión eficiente del espacio, la accesibilidad, la precisión y la simplicidad [34]. Se han tenido en cuenta estos aspectos para abordar las necesidades específicas del joyero artesano promedio, buscando asegurar la eficiencia y la alta calidad del producto final [35]. La propuesta de este sistema robótico representa una solución eficiente y precisa que podría mejorar significativamente la producción de joyas personalizadas de alta calidad en la industria joyera.

La utilización de un sistema robótico de arquitectura cartesiana para aplicaciones de grabado láser de joyería presenta múltiples ventajas. En primer lugar, la precisión y repetibilidad son esenciales en la producción de joyas personalizadas de alta calidad. El grabado con tecnología láser ofrece una precisión y detalle excepcionales, Sin embargo requiere contar con movimientos que sean precisos y controlados para lograr los mejores resultados. Por lo tanto, el uso de un robot manipulador cartesiano es capaz de proporcionar la precisión y control necesarios para crear patrones detallados y precisos con alta calidad de acabado. En segundo lugar, el diseño mecánico del robot manipulador cartesiano puede ser optimizado para satisfacer las necesidades específicas del joyero artesano promedio. La mayoría de los joyeros tienen espacios de trabajo reducidos, por lo que la gestión eficiente del espacio y la accesibilidad se cuentan como factores críticos para la elección del equipo. Un robot manipulador cartesiano puede ser diseñado con dimensiones físicas adecuadas que permitan una fácil colocación en el espacio de trabajo del joyero, y su configuración ergonómica permite un fácil acceso y uso para el joyero, lo que garantizaría la comodidad y la eficiencia del operador. En tercer lugar, el uso de un robot manipulador cartesiano para aplicaciones de grabado de joyería con tecnología láser permite un mayor grado de personalización y creatividad. Los joyeros pueden utilizar software de diseño asistido por computadora para crear sus propios patrones y tener una amplia variedad de diseños personalizados, lo que les permite diferenciarse de los diseños en serie y brindar a los clientes la oportunidad de crear piezas únicas y personalizadas que se adapten a sus gustos y preferencias individuales.

Por otra parte, el uso de un robot manipulador cartesiano para aplicaciones de grabado de joyería con tecnología láser puede mejorar significativamente la eficiencia y la productividad del proceso de producción. El proceso de grabado láser es rápido y preciso, lo que permite a los artistas artesanos crear más piezas en menos tiempo, y con una mayor calidad y precisión. Desde esta perspectiva, este trabajo presenta las bases para lo que podría representarse como una solución innovadora, efectiva y económica para la producción de joyería personalizada mediante tecnología láser. El sistema robótico de arquitectura cartesiana con tres grados de libertad y el esquema de control de movimiento basado en una ley de control lineal con una acción de control de tipo Proporcional-Derivativo (PD) han sido diseñados y evaluados detalladamente, demostrando su capacidad para el seguimiento de perfiles de movimiento en el efector final del robot; perfiles de movimiento que con un control adecuado sobre el rayo láser podrían producir grabados de alta calidad en materiales metálicos para piezas de joyería con geometría bidimensional.

Como se dijo previamente, la propuesta de este sistema robótico para el grabado láser en joyería puede mejorar significativamente la eficiencia y la productividad del proceso de producción de joyas personalizadas de alta calidad, además de reducir considerablemente los costos de producción del sistema. Por otro lado, el empleo de un robot manipulador cartesiano en aplicaciones de grabado láser de joyería presenta múltiples ventajas, como lo son la precisión y repetibilidad, la optimización del diseño mecánico para satisfacer las necesidades del joyero artesano, la posibilidad de mayor personalización y creatividad, y la mejora en la eficiencia y productividad del proceso de producción; así como también la reducción de costos de implementación, lo que lo hace una propuesta accesible. El trabajo contribuye al estado del arte en robótica, manufactura y control de movimiento, presentando una solución eficiente y precisa para su aplicación en el grabado de joyería por medio de tecnología láser. Los resultados obtenidos en los casos de estudio validan la eficacia del esquema de control de seguimiento de perfiles de movimiento del efector final del sistema robótico, lo que impacta directamente en la capacidad del sistema para poder producir grabados de alta calidad en piezas de joyería con geometría bidimensional.

La estructura de este trabajo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se presenta el modelo matemático de un robot manipulador cartesiano de tres grados de libertad así como la descripción de los sistemas de transmisión de movimiento de los eslabones del robot y las principales características del diseño mecánico presentado. En la sección 3 se aborda la sintonización del esquema de control de movimiento propuesto, el cual está basado en una ley de control lineal con una acción de control de tipo Proporcional-Derivativo (PD). En la sección 4 se exponen los resultados obtenidos para evaluar el desempeño satisfactorio del sistema, presentando dos casos de estudio y discutiendo sus implicaciones. Finalmente, la sección 5 describe las conclusiones del trabajo presentado, destacando las contribuciones y el posible impacto que se pueda llegar a tener en el área del grabado de joyería con tecnología láser.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 26, pp. 331 - 349
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

2. Modelado Matemático del Robot Manipulador Cartesiano

Un robot es una máquina reprogramable que es capaz de llevar a cabo tareas automáticamente [36]. Los sistemas robóticos se diseñan para realizar diferentes tipos de funciones, específicamente, en este trabajo se aborda un sistema robótico de tres grados de libertad de arquitectura cartesiana. Esta clase de robots manipuladores se caracterizan por tener una estructura rígida en la que todas sus articulaciones son de tipo prismáticas. Debido a esto, el robot realiza únicamente movimientos lineales, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieran una elevada precisión en el posicionamiento del efector final [37]. Por otro lado, la incorporación de manufactura sustractiva a través de tecnología láser como herramienta de un robot de estas características, proporciona fiabilidad y extrema precisión en los movimientos del efector final. La figura 1 muestra el diseño mecánico del sistema robótico considerado en este trabajo.

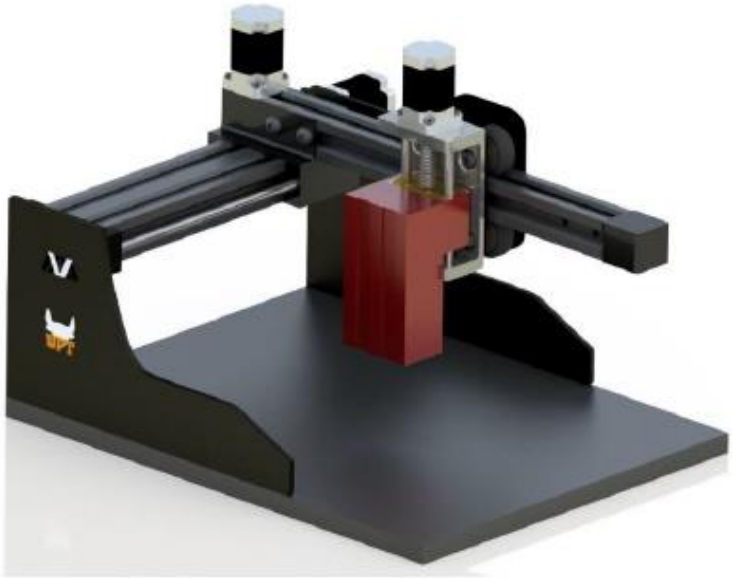


Figura 1. Diseño mecánico del sistema robótico considerado.

2.1 Modelo Cinemático del Robot Manipulador Cartesiano

El modelo cinemático de un robot manipulador plantea las relaciones existentes entre el sistema de coordenadas en su espacio articular y el sistema de coordenadas en el espacio de trabajo [38]. El diagrama de la figura 2 muestra la cadena cinemática del sistema robótico considerado.

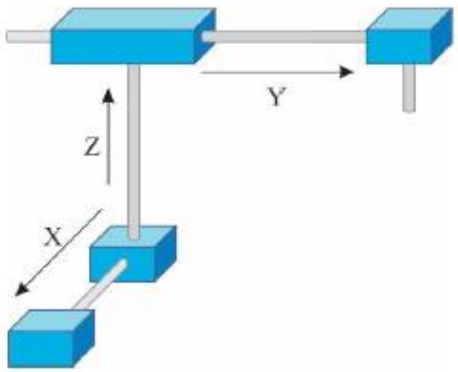


Figura 2. Cadena cinemática del sistema robótico considerado.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 26, pp. 331 - 349
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Se plantea el sistema de referencia fijo expresado en la ecuación (1) como:

$$\sum_0(X_0, Y_0, Z_0) \tag{1}$$

Aquí, el eje X_0 determina el movimiento de traslación de la articulación d_1, luego, el eje Y_0 determina el movimiento de traslación de la articulación d_2; por último, el eje Z_0 determina el movimiento de traslación de la articulación d_3. El diagrama mostrado en la figura 3 describe los sistemas de referencia del robot.

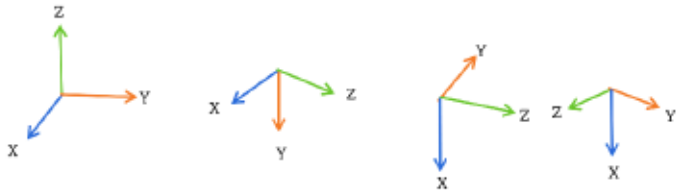


Figura 3. Sistemas de referencia del sistema robótico considerado.

Estableciendo rotaciones sobre los ejes $X = \alpha$ y $Z = \theta$, la tabla de parámetros Denavit-Hartenberg queda planteada de la siguiente manera:

Tabla 2. Parámetros Denavit-Hartenberg del Robot Manipulador Cartesiano.

N° de Eslabón	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	0	d_1	0	$-\frac{\pi}{2}$
2	0	d_2	0	$-\frac{\pi}{2}$
3	0	d_3	0	0

Ahora, de acuerdo con la ecuación (2) se requiere realizar la multiplicación entre las matrices de transformación homogénea de cada eslabón, a través de esto se obtiene la matriz de transformación homogénea T_0^3 que describe el sistema robótico completo, de ella se debe extraer el vector que expresa el modelo cinemático directo del robot manipulador cartesiano, el cual queda expresado posteriormente en la ecuación (3).

$$T_3^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \tag{3}$$

De la ecuación (3) se puede observar que las relaciones existentes entre el espacio cartesiano y el espacio articular del robot manipulador se obtienen de manera lineal. Esto es posible debido a que el movimiento que realizan los eslabones del robot manipulador es de tipo traslacional o lineal dado que sus tres articulaciones son prismáticas. En vista de lo anterior, resulta innecesario realizar el cálculo del modelo cinemático inverso del robot.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 26, pp. 331 - 349
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

2.2 Modelo Dinámico del Robot Manipulador Cartesiano

El modelo dinámico de un robot manipulador describe los fenómenos físicos que se encuentran de forma intrínseca en su estructura, tales como los efectos inerciales, las fuerzas centrípetas y de Coriolis, el torque debido a la gravedad y la fricción, entre otros [39]. En este caso se establecen como entradas del sistemas las fuerzas de control requeridas para desplazar cada uno de los eslabones, y como salidas se tienen los desplazamientos lineales del robot sobre los ejes X, Y y Z. La dinámica del robot establece las relaciones matemáticas entre sus coordenadas articulares, las fuerzas aplicadas en los eslabones y los parámetros del robot [40].

Se utilizó la metodología de Euler-Lagrange para calcular las ecuaciones de fuerza aplicada que describen el movimiento del robot manipulador cartesiano. En la figura 4 se presenta el diagrama de cuerpo libre del sistema robótico considerado.

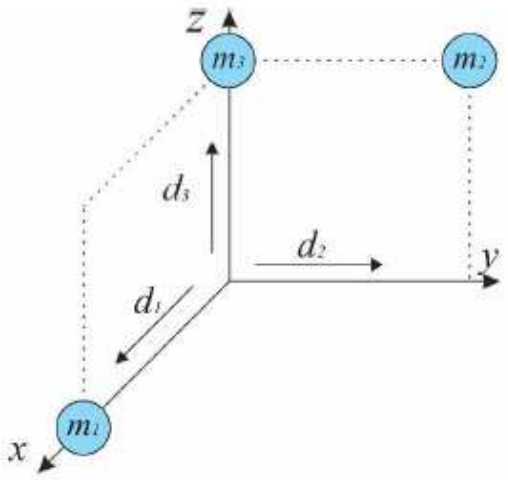


Figura 4. Diagrama de cuerpo libre del robot manipulador cartesiano.

Para obtener las ecuaciones de movimiento del robot manipulador cartesiano a través de la metodología de Euler-Lagrange se plantea el Lagrangiano del sistema, expresado en la ecuación (4), el cual describe la suma algebraica de la energía cinética y potencial del sistema.

$$L = K - P \tag{4}$$

Por lo tanto, la energía cinética y potencial de cada eslabón del sistema robótico se describen en las ecuaciones (5) y (6) como:

$$K = K_1 + K_2 + K_3 \;\; \therefore \;\; K = \frac{1}{2}(m_1)\dot{d}_1^2 + \frac{1}{2}(m_2 + m_3)\dot{d}_2^2 + \frac{1}{2}(m_1 + m_2 + m_3)\dot{d}_3^2 \tag{5}$$

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \;\; \therefore \;\; P = -F_1 d_1 - F_2 d_2 - F_3 d_3 + (m_1 + m_2 + m_3) g d_3 \tag{6}$$

De la ecuación (6), F_1, F_2 y F_3 son las fuerzas aplicadas a cada eslabón. De acuerdo con las ecuaciones previas, el Lagrangiano completo del sistema queda expresado en la ecuación (7) como:

$$L = \frac{1}{2}(m_1)\dot{d}_1^2 + \frac{1}{2}(m_2 + m_3)\dot{d}_2^2 + \frac{1}{2}(m_1 + m_2 + m_3)\dot{d}_3^2 - (m_1 + m_2 + m_3) g d_3 + F_1 d_1 + F_2 d_2 + F_3 d_3 \tag{7}$$

A partir de la ecuación (7), se aplica la derivación de Euler-Lagrange expresada en la ecuación (8), la cual permite obtener las ecuaciones de movimiento del sistema.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{d}}\right) - \frac{\partial L}{\partial d} = F, \;\; d = [d_1, d_2, \ldots, d_n]^T \tag{8}$$

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 26, pp. 331 - 349
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Por lo tanto, luego de aplicar la metodología de la ecuación (8), las ecuaciones de fuerza aplicada que describen el movimiento del robot manipulador cartesiano quedan expresadas en las ecuaciones (9), (10) y (11) como:

$$m_1\ddot{d}_1 = F_1 \tag{9}$$

$$(m_2 + m_3)\ddot{d}_2 = F_2 \tag{10}$$

$$(m_1 + m_2 + m_3)\ddot{d}_3 + (m_1 + m_2 + m_3)g = F_3 \tag{11}$$

En términos del vector de estado $[d_1 \quad d_2 \quad d_3 \quad \dot{d}_1 \quad \dot{d}_2 \quad \dot{d}_3]^T$, las ecuaciones de movimiento del robot pueden expresarse en la ecuación (12) como:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \\ \dot{d}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \\ \dot{d}_3 \\ \frac{F_1}{m_1} \\ \frac{F_2}{(m_2+m_3)} \\ \frac{F_3}{(m_1+m_2+m_3)} - g \end{bmatrix} \tag{12}$$

De igual manera, las ecuaciones de movimiento del robot pueden expresarse de forma matricial, lo cual será de gran utilidad para fines de control. Así, el modelo dinámico del robot manipulador cartesiano se expresa de forma compacta en la ecuación (13) como:

$$M(d)\ddot{d} + G(d) = F \tag{13}$$

Con:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 + m_3 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 + m_2 + m_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{d}_1 \\ \ddot{d}_2 \\ \ddot{d}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_1 + m_2 + m_3 \end{bmatrix} g = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \tag{14}$$

2.3 Descripción del Diseño Mecánico y Características de los Sistemas de Transmisión de Movimiento

En este trabajo se presenta un sistema robótico innovador para el grabado láser de alta precisión en pequeñas piezas de joyería. A diferencia de la mayoría de los sistemas de grabado disponibles, que suelen emplear un solo sistema de transmisión de potencia, como la banda-polea, el engrane-cremallera o el tornillo-tuerca, el diseño propuesto incorpora dos sistemas de transmisión de potencia, que son la banda-polea y el tornillo-tuerca. Esta combinación permite obtener una mayor precisión y control en el movimiento, lo que se traduce en grabados más detallados y precisos con un alto grado de acabado. El sistema robótico propuesto utiliza una arquitectura cartesiana con tres grados de libertad que permiten movimientos precisos en X, Y y Z, proporcionando la capacidad de grabar patrones bidimensionales complejos con alta precisión y calidad.

En las figuras 5, 6 y 7 se presenta en detalle cada uno de los eslabones del robot manipulador cartesiano propuesto junto con las propiedades físicas que los describen. Cada eslabón está diseñado para realizar movimientos precisos y controlados sobre uno de los ejes del espacio cartesiano. La figura 5 muestra el primer eslabón, que se mueve a lo largo del eje X. La figura 6 presenta el segundo eslabón, que se mueve a lo largo del eje Y. La figura 7 muestra el tercer eslabón, que se mueve a lo largo del eje Z. Las propiedades físicas que caracterizan cada uno de los eslabones fueron calculadas mediante el software de diseño asistido por computadora en el que se llevo a cabo el diseño mecánico del sistema.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 26, pp. 331 - 349
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Figura 5. Eslabón de movimiento en el eje X y sus propiedades físicas.

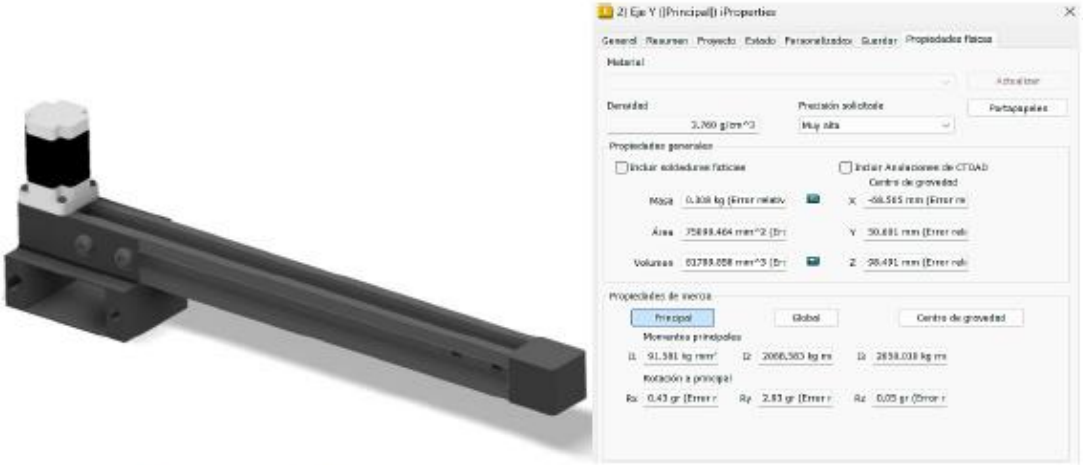


Figura 6. Eslabón de movimiento en el eje Y y sus propiedades físicas.

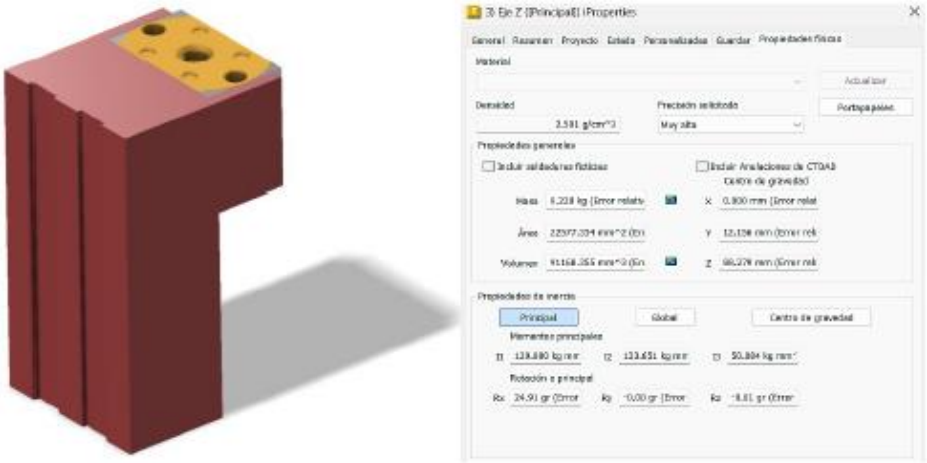


Figura 7. Eslabón de movimiento en el eje Z y sus propiedades físicas.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 26, pp. 331 - 349
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Las propiedades físicas de los eslabones muestran el valor de la masa del total de las piezas que los conforman, así como su área, volumen y las coordenadas en X, Y y Z de su centro de gravedad, los momentos principales de inercia y la rotación con base a la orientación del posicionamiento del eslabón. El movimiento en cada uno de los ejes del espacio cartesiano es impulsado por motores a pasos, que generan un torque en los sistemas de conversión de movimiento angular a movimiento lineal. Este diseño mecánico permite lograr una alta precisión y control en el movimiento del robot manipulador. La figura 8 muestra el movimiento logrado por el sistema de transmisión de potencia del robot manipulador.

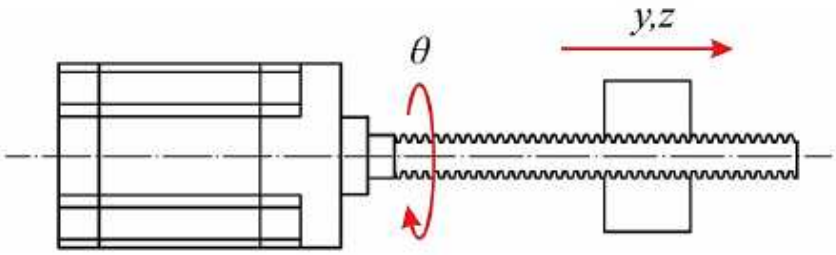


Figura 8. Detalle del sistema de transmisión para el movimiento en los ejes Y y Z.

En el sistema de transmisión por tuerca y tornillo, se utiliza un husillo normalizado según la norma ISO 2903-DIN 103, con un paso de rosca de $2\,mm$, lo que garantiza la compatibilidad y facilidad de reemplazo de las piezas. Este sistema de transmisión se caracteriza por su capacidad de generar un movimiento preciso y uniforme en los ejes Y y Z del espacio cartesiano. La figura 9 muestra el montaje y los parámetros clave de este sistema.

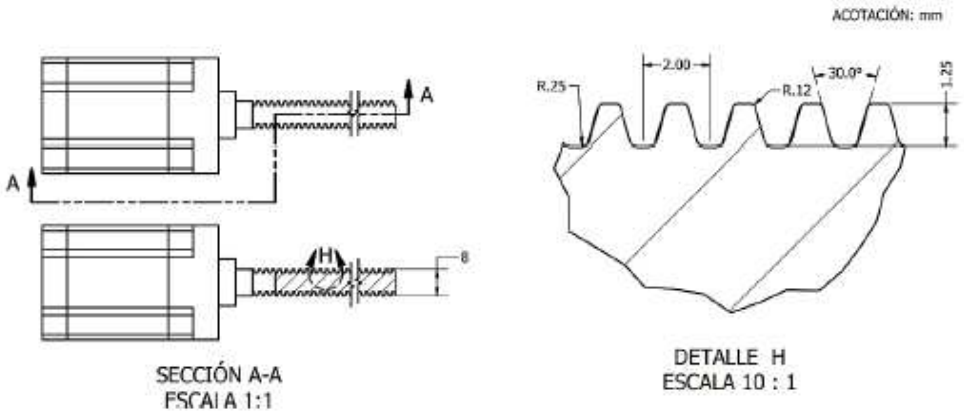


Figura 9. Montaje del sistema de transmisión para el movimiento en los ejes Y y Z.

Para el eje X, el sistema de transmisión por banda y poleas es utilizado debido a su capacidad de transmitir la potencia de manera eficiente y sin una reducción, lo que permite generalizar las rotaciones del motor. En la figura 10 se muestra la representación utilizada en el diseño propuesto, donde el diámetro de contacto de la polea es de $10\,mm$. La selección de este sistema de transmisión permite lograr una precisión y uniformidad de movimiento en el eje X del espacio cartesiano.

La característica principal de este robot es el eslabón correspondiente al movimiento en el eje X que se encuentra suspendido de un extremo. Esto facilita el manejo del usuario ya que no restringe estructuralmente el espacio de trabajo, como se puede ver en las figuras 10, 11 y 12. Otro aspecto destacable es que el diseño mecánico del robot lo hace ideal para trabajar en espacios reducidos sin comprometer la capacidad de movimiento.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 26, pp. 331 - 349
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

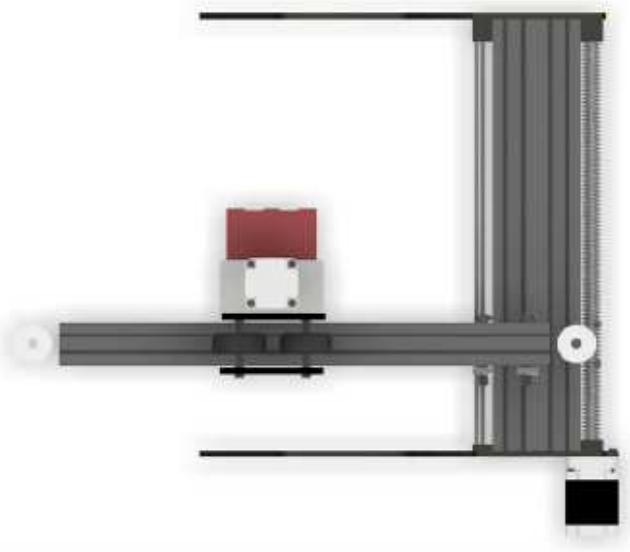


Figura 10. Sistema de transmisión de movimiento por banda y poleas para el movimiento en el eje X.

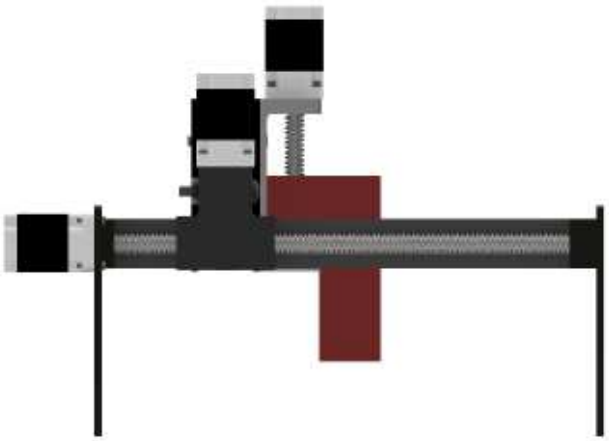


Figura 11. Sistema de transmisión de movimiento por tuerca y tornillo para el movimiento en el eje Y.

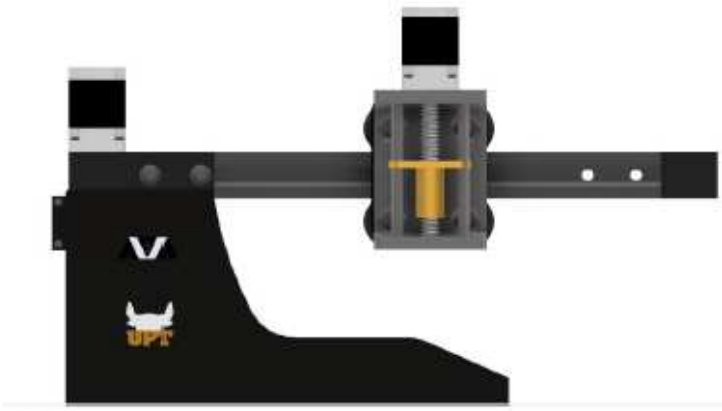


Figura 12. Sistema de transmisión de movimiento por tuerca y tornillo para el movimiento en el eje Z.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 26, pp. 331 - 349
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Con el fin de evitar pérdidas de energía en la potencia generada sobre los tornillos, se han instalado rodamientos de apoyo en el sistema robótico, lo cual es gráficamente visible en la figura 13. Estos rodamientos permiten eliminar la constante de fricción, lo que garantiza una mayor eficiencia en la transmisión de movimiento del robot. Reducir la fricción en el sistema, permite disminuir el desgaste de los componentes y aumentar la vida útil del robot manipulador. Además, el uso de rodamientos de apoyo también mejora la precisión y la estabilidad en el movimiento, lo que es especialmente importante en aplicaciones de alta precisión como lo es el proceso de grabado de joyería.

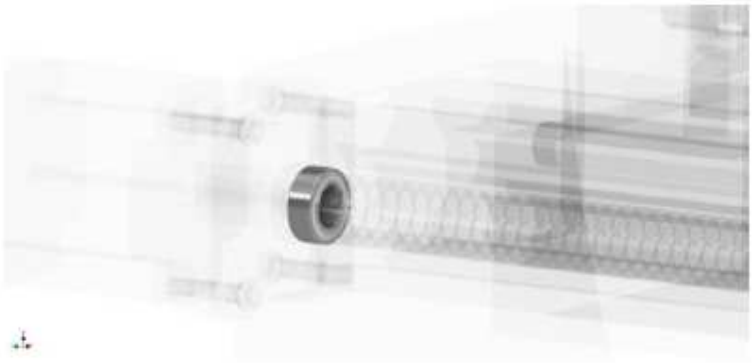


Figura 13. Visibilidad de rodamientos incorporados en el sistema.

3. Planificación de Trayectorias y Control de Movimiento

En esta sección se propone un esquema de control de movimiento basado en una ley de control lineal con una acción de control auxiliar de tipo Proporcional-Derivativo (PD) con una prealimentación de los perfiles de movimiento de referencia del sistema [41]. En este caso se considera la dinámica del sistema en su forma estándar, dada por las ecuaciones (15), (16) y (17):

$$\ddot{X} = \frac{1}{m_1} F_1 \tag{15}$$

$$\ddot{Y} = \frac{1}{(m_1+m_2)} F_2 \tag{16}$$

$$\ddot{Z} = \frac{1}{(m_1+m_2+m_3)} F_3 - g \tag{17}$$

Ahora, se propone una ley de control lineal para cada uno de los ejes de movimiento del sistema robótico, expresada en las ecuaciones (18), (19) y (20):

$$F_1 = m_1 v_X \tag{18}$$

$$F_2 = (m_2 + m_3) v_Y \tag{19}$$

$$F_3 = (m_1 + m_2 + m_3)(v_Z + g) \tag{20}$$

En donde v_X, v_Y y v_Z son controladores auxiliares o virtuales con acciones de control de tipo Proporcional-Derivativo (PD) expresados en las ecuaciones (21), (22) y (23):

$$v_X = \ddot{X}^* - K_p e_X - K_d \dot{e}_X \tag{21}$$

$$v_Y = \ddot{Y}^* - K_p e_Y - K_d \dot{e}_Y \tag{22}$$

$$v_Z = \ddot{Z}^* - K_p e_Z - K_d \dot{e}_Z \tag{23}$$

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 26, pp. 331 - 349
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

De las ecuaciones anteriores $\ddot{X}^*$, $\ddot{Y}^*$ y $\ddot{Z}^*$ son las aceleraciones en los ejes X, Y y Z de la trayectoria de referencia dada, $e_X = X - X^*$, $e_Y = Y - Y^*$ y $e_Z = Z - Z^*$ son los errores de seguimiento de los perfiles de posición en cada uno de los ejes, respectivamente. Sustituyendo las ecuaciones (18) – (23) en las ecuaciones (15), (16) y (17), se obtiene la dinámica en lazo cerrado expresada por las ecuaciones (24), (25) y (26):

$$\ddot{X} - \ddot{X}^* = -K_p e_X - K_d \dot{e}_X \tag{24}$$

$$\ddot{Y} - \ddot{Y}^* = -K_p e_Y - K_d \dot{e}_Y \tag{25}$$

$$\ddot{Z} - \ddot{Z}^* = -K_p e_Z - K_d \dot{e}_Z \tag{26}$$

La cual queda reescrita en términos del error de seguimiento en cada uno de los ejes, como se puede ver en las ecuaciones (27), (28) y (29):

$$\ddot{e}_X + K_d \dot{e}_X + K_p e_X = 0 \tag{27}$$

$$\ddot{e}_Y + K_d \dot{e}_Y + K_p e_Y = 0 \tag{28}$$

$$\ddot{e}_Z + K_d \dot{e}_Z + K_p e_Z = 0 \tag{29}$$

Con el objetivo de lograr estabilidad en lazo cerrado, es necesario seleccionar los parámetros de control de tal manera que $K_p, K_d > 0$. Por otro lado, a través de la técnica de asignación de polos [42, 43] se considera un polinomio deseado de segundo orden, expresado en la ecuación (30):

$$P_d(s) = s^2 + 2\zeta\omega_c s + \omega_c^2 \tag{30}$$

Así, los parámetros de control pueden seleccionarse de tal manera que $K_d = 2\zeta\omega_c$ y $K_p = \omega_c^2$, en los que ζ es el factor de amortiguamiento deseado y ω_c es la frecuencia natural deseada del sistema.

4. Resultados

Con el objetivo de validar el desempeño del esquema de control presentado, se propusieron dos casos de estudio a nivel simulación que permiten observar la precisión y la velocidad de respuesta del controlador de movimiento planteado. Para este fin se obtuvieron los parámetros numéricos del sistema robótico diseñado, los cuales se describen en la tabla 3.

Tabla 3. Características Físicas del Robot.

Definición	Parámetro	Valor	Unidad
Longitud del eslabón 1 – Desplazamiento en el eje X	d_1	208.055	mm
Longitud del eslabón 2 – Desplazamiento en el eje Y	d_2	200	mm
Longitud del eslabón 3 – Desplazamiento en el eje Z	d_3	57.50	mm
Masa del eslabón 1	m_1	0.449	kg
Masa del eslabón 2	m_2	0.308	kg
Masa del eslabón 3	m_3	0.228	kg
Aceleración gravitacional	g	9.81	m/s^2

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 26, pp. 331 - 349
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Las matrices que contienen los parámetros de control se presentan en la ecuación (31) como:

$$K_p = \begin{bmatrix} k_p & 0 & 0 \\ 0 & k_p & 0 \\ 0 & 0 & k_p \end{bmatrix}, \quad K_d = \begin{bmatrix} k_d & 0 & 0 \\ 0 & k_d & 0 \\ 0 & 0 & k_d \end{bmatrix} \tag{31}$$

Los valores numéricos para calcular los parámetros de control fueron $\zeta = 0.6$ y $\omega_c = 5\ rad/s$.

La figura 14 muestra el seguimiento de la trayectoria de referencia planteada en el primer caso de estudio, aquí se ve el seguimiento de un perfil de tipo "corazón". Posteriormente, en la figura 15 se presenta el seguimiento del perfil de movimiento correspondiente de cada eslabón en su eje de trabajo.

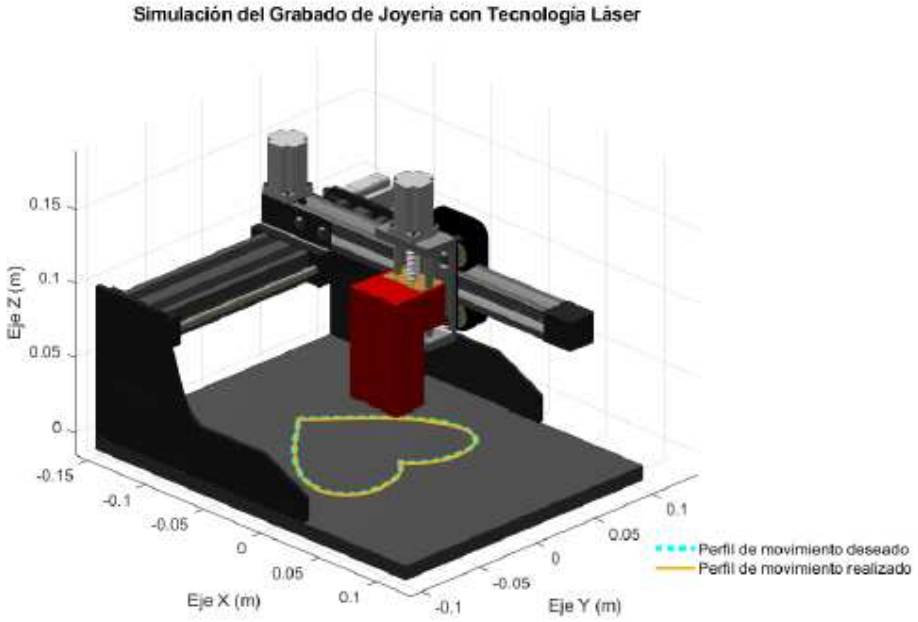


Figura 14. Seguimiento de la trayectoria de referencia para el primer caso de estudio.

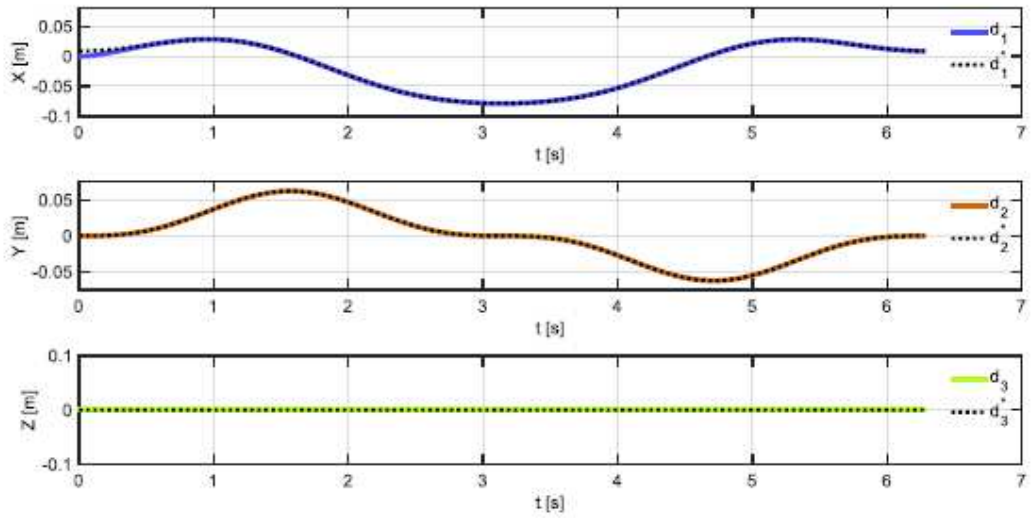


Figura 15. Posición controlada de los eslabones del robot manipulador para el primer caso de estudio.

A continuación, en la figura 16 se presenta el error de posición lineal de cada uno de los eslabones l robot manipulador para el seguimiento de la trayectoria de referencia mostrada en la figura 14. De figura 16 es muy importante destacar que el error de posición del sistema robótico es mínimo, debido a resolución marcada en la gráfica, en función de esto queda evidencia de que el esquema de control esentado permite obtener una alta precisión en el desplazamiento de los eslabones del robot.

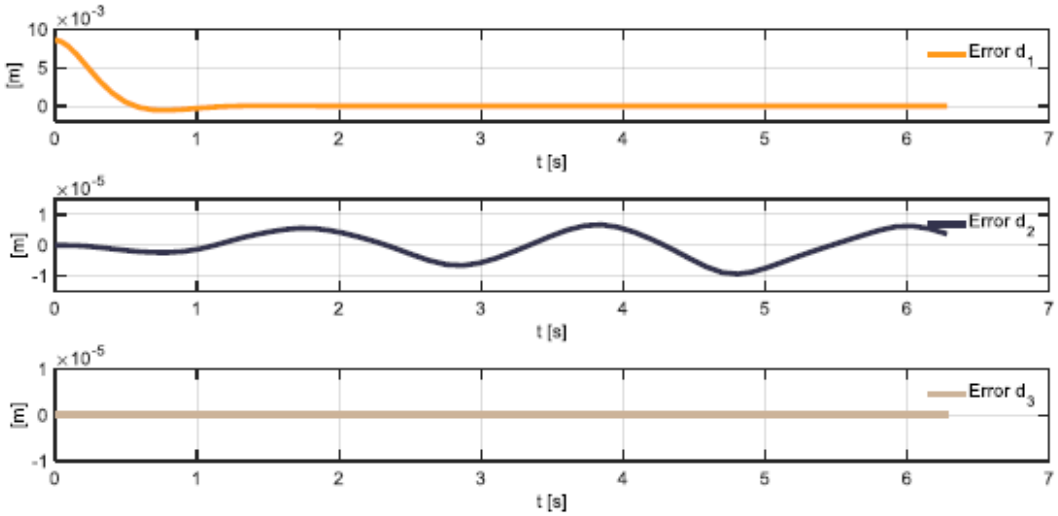


Figura 16. Error de posición de los eslabones del robot manipulador para el primer caso de estudio.

Luego, en la figura 17 se pueden apreciar las fuerzas de control demandadas por cada uno de s eslabones del robot manipulador. Debido a los valores numéricos de amortiguamiento y frecuencia tural seleccionados para calcular los parámetros de los controladores, fue posible obtener señales de erza de magnitudes muy bajas en los eslabones que se desplazan sobre los ejes X y Y. En el caso de fuerza requerida por el eslabón que se desplaza sobre el eje Z es importante mencionar que en este so se requiere compensar la fuerza gravitatoria ejercida sobre el sistema, debido a esto el sistema manda una fuerza de control constante.

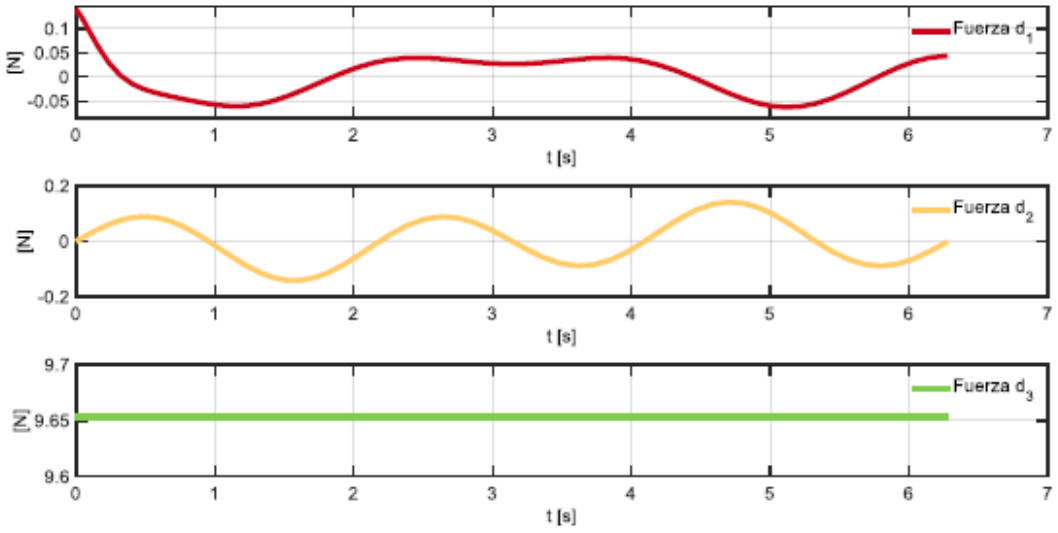


Figura 17. Fuerzas de control demandadas por el robot manipulador para el primer caso de estudio.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 26, pp. 331 - 349
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Ahora se presentan las gráficas resultantes del segundo caso de estudio, en la figura 18 se puede observar el seguimiento de un perfil de movimiento de tipo "infinito", en el cual, al igual que en el caso de estudio anterior, es bastante notoria la precisión con la que se realizó el seguimiento. Esto se puede respaldar por medio de los resultados presentados en la figura 19, en los que se presenta el seguimiento que efectuó cada eslabón del robot.

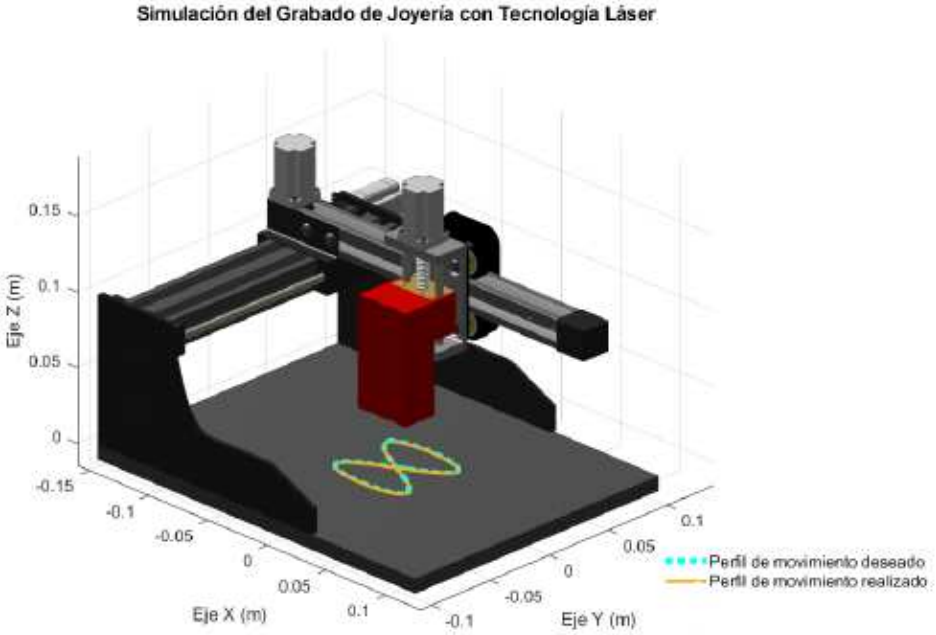


Figura 18. Seguimiento de la trayectoria de referencia para el segundo caso de estudio.

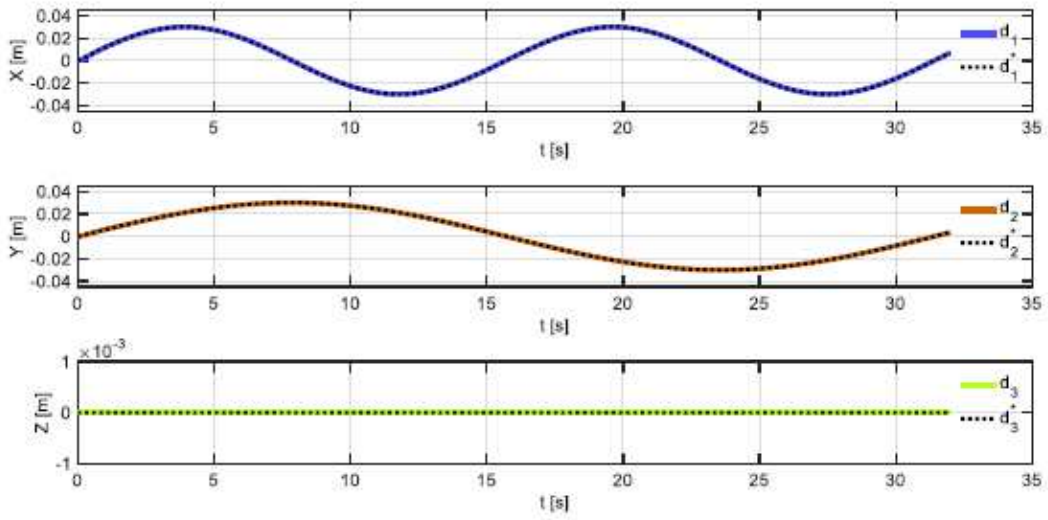


Figura 19. Posición controlada de los eslabones del robot manipulador para el segundo caso de estudio.

Por último, la figura 20 presenta los errores de posición de los eslabones, que debido a la eficacia del esquema de control son de magnitud milimétrica. La figura 21 muestra las fuerzas de control demandadas por el robot para poder llevar a cabo el seguimiento de la trayectoria de referencia dada.

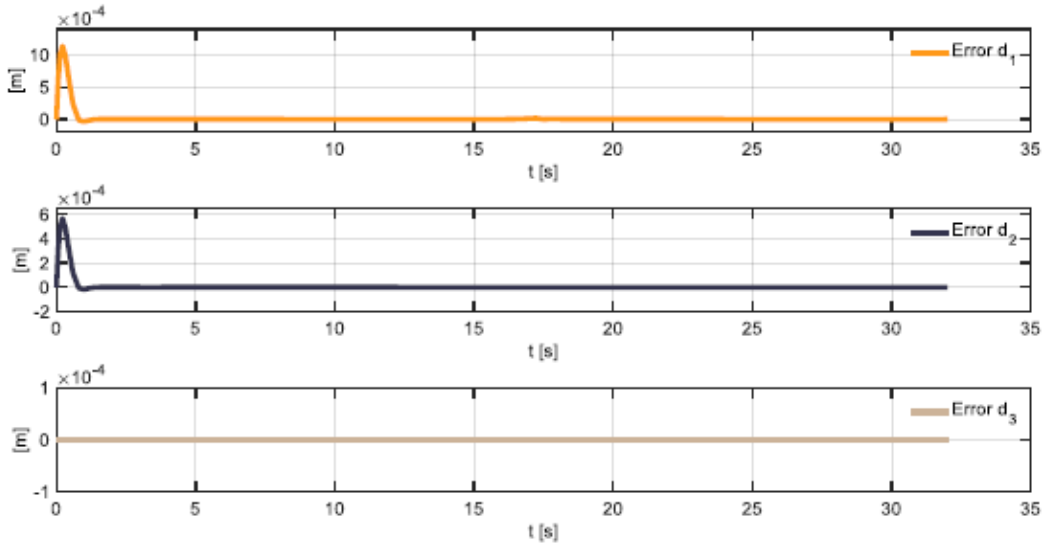


Figura 20. Error de posición de los eslabones del robot manipulador para el segundo caso de estudio.

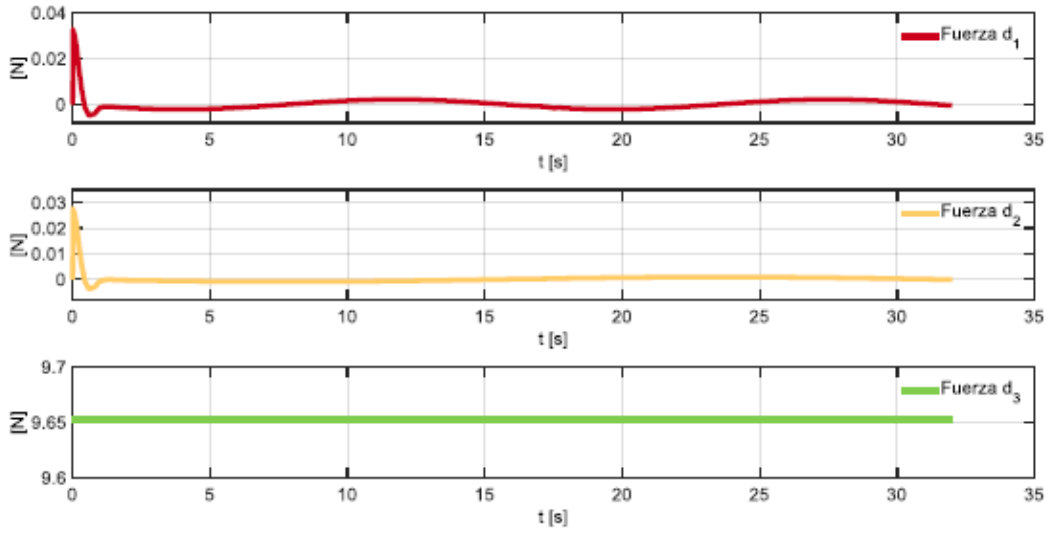


Figura 21. Fuerzas de control demandadas por el robot manipulador para el segundo caso de estudio.

5. Conclusiones

En este trabajo se presenta el diseño mecánico y el control de movimiento de un sistema robótico de tres grados de libertad de arquitectura cartesiana para grabado de joyería con tecnología láser. En la etapa de diseño mecánico se consideraron sistemas de transmisión de movimiento por banda y poleas para el movimiento en el eje X, para efectuar el movimiento en los ejes Y y Z se consideraron sistemas de transmisión de movimiento por tuerca y tornillos, los cuales permitieron convertir el desplazamiento angular de los actuadores considerados en el desplazamiento lineal característico de este tipo de sistemas. Para el control de movimiento del sistema robótico considerado se utilizó una ley de control lineal con acciones de control auxiliares de tipo Proporcional-Derivativo (PD) además de una prealimentación con los perfiles de movimiento deseados. Los casos de estudio presentados destacan una excelente precisión y velocidad de respuesta del esquema de control para el seguimiento de perfiles de movimiento, además de demandar señales de control de baja magnitud.

Referencias

[1] Cuevas M.R. (2013). "*Breve historia de la técnica del grabado*". Recuperado de https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/ida/n2/e3.html. Fecha de consulta: [28 de marzo de 2023].
[2] Gravotech. (s.f.). "*Grabado de aluminio y marcado láser*". Recuperado de https://www.gravotech.mx/las-aplicaciones/grabado-de-aluminio. Fecha de consulta: [28 de marzo de 2023].
[3] Gravotech. (s.f.). "*Grabado y marcado de metales*". Recuperado de https://www.gravotech.mx/las-aplicaciones/grabado-en-metal. Fecha de consulta: [28 de marzo de 2023].
[4] Zhang, Guowei, et al. "*Design and Implementation of Intelligent Writing Robot*". 4th International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA). IEEE, 2022. p. 74-79.
[5] Gravotech. (s.f.). "*Personalizar y grabar joyas*". Recuperado de https://www.gravotech.mx/las-aplicaciones/personalizar-y-grabar-joyas. Fecha de consulta: [28 de marzo de 2023].
[6] Gravograph. (16 de septiembre de 2019). "*Máquinas de grabado y corte para joyería. ¿Cuál elegir?*". Recuperado de https://www.gravograph.es/blog/aplicaciones/personalizacion/maquinas-de-grabado-y-corte-para-joyeria/. Fecha de consulta: [28 de marzo de 2023].
[7] Ruutiainen, Mika, et al. "*Real-time monitoring and control of ultra-fast laser engraving process utilizing spectrometer*". IEEE Access, 2022, vol. 10, p. 27113-27120.
[8] Monge Joyeros. (23 de marzo de 2017). "*Orígenes de la joyería: ¿Desde cuándo existen las joyas?*". Recuperado de https://mongejoyeros.com/blog/origenes-de-la-joyeria-desde-cuando-existen-las-joyas/. Fecha de consulta: [28 de marzo de 2023].
[9] LASIT. (s.f.). "*Grabado con láser en joyas | Marcados precisos e indelebles*". Recuperado de https://www.lasitlaser.es/grabado-laser-joyas/. Fecha de consulta: [29 de marzo de 2023].
[10] Trotec Laser. (s.f.). "*Grabado y corte láser en cuero*". Recuperado de https://www.troteclaser.com/es-mx/materiales/grabado-con-laser-de-cuero. Fecha de consulta: [29 de marzo de 2023].
[11] Diaci, Janez, et al. "*Rapid and flexible laser marking and engraving of tilted and curved surfaces*". Optics and lasers in engineering, 2011, vol. 49, no 2, p. 195-199.
[12] Epilog Laser. (s.f.). "*Grabado de joyas por láser*". Recuperado de https://www.epiloglaser.co/recursos/club-de-muestras/grabado-l%C3%A1ser-de-joyas.htm. Fecha de consulta: [29 de marzo de 2023].
[13] Cooper, Frank. "*Sintering and additive manufacturing:"additive manufacturing and the new paradigm for the jewellery manufacturer*". Progress in Additive Manufacturing, 2016, vol. 1, no 1-2, p. 29-43.
[14] Revista El Mueble y la Madera. (s.f.). "*Tecnología Láser: el aliado perfecto para cortes y grabados precisos*". Recuperado de http://revista-mm.com/maquinaria-y-mantenimiento/tecnologia-laser-el-aliado-perfecto-para-cortes-y-grabados-precisos/. Fecha de consulta: [29 de marzo de 2023].
[15] Laserax. (2018). ¿Cómo funciona el grabado láser? https://www.laserax.com/es/blog/como-funciona-el-grabado-laser. Fecha de consulta: [20 de abril de 2023].
[16] Trotec Laser. (s. f.). Ayuda y asistencia. https://www.troteclaser.com/es-mx/ayuda-y-asistencia. Fecha de consulta: [20 de abril de 2023].
[17] CreativaLab. (2019). Materiales para corte y grabado láser. https://creativalab.io/blogs/noticias/materiales-para-corte-y-grabado-laser. Fecha de consulta: [20 de abril de 2023].
[18] Trotec Laser. (s. f.). Centro de ayuda - Parámetros láser/ajustes. https://www.troteclaser.com/es-mx/ayuda-y-asistencia/centro-de-ayuda/parametros-laser-ajustes. Fecha de consulta: [20 de abril de 2023].
[19] Interempresas.net. (2006). El grabado mediante láser reduce los residuos. https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/16561-El-grabado-mediante-laser-reduce-los-residuos.html. Fecha de consulta: [20 de abril de 2023].
[20] Materiales Grabado. (s. f.). ¿Cómo hallar los parámetros de láser correctos? https://www.materiales-grabado.es/instrucciones/como-hallar-los-parametros-de-laser-correctos-1. Fecha de consulta: [20 de abril de 2023].
[21] Maquinas Laser México. (s. f.). Grabado láser para joyería. https://www.maquinaslasermexico.com/grabado-laser-para-joyeria/. Fecha de consulta: [21 de abril de 2023].

[22] Feiyang Maquinaria. (s. f.). Grabado láser joyería. https://www.feiyangmaquinaria.com/grabado-laser-joyeria/. Fecha de consulta: [21 de abril de 2023].
[23] Qualitetch. (s.f.). Proceso de grabado químico. https://www.qualitetch.com/es/service/proceso-de-grabado-quimico/. Fecha de consulta: [21 de abril de 2023].
[24] Gravograph. (s. f.). Diferencias entre el grabado mecánico y el grabado láser. https://www.gravograph.es/blog/productos/maquinas/diferencias-entre-el-grabado-mecanico-y-el-grabado-laser/. Fecha de consulta: [21 de abril de 2023].
[25] GravoTech México. (s.f.). Grabado en acero. https://www.gravotech.mx/las-aplicaciones/grabado-en-acero. Fecha de consulta: [21 de abril de 2023].
[26] Gold And Time. (2018). "*¿Cómo están influyendo las nuevas tecnologías en la industria joyera?*". Recuperado de https://www.goldandtime.org/noticia/81853/goldtime/como-estan-influyendo-las-nuevas-tecnologias-en-la-industria-joyera.html. Fecha de consulta: [29 de marzo de 2023].
[27] Han's Laser. (s.f.). "*Laser marking and welding of jewelry*". Recuperado de https://mx.hanslaser.net/application/joyera.html. Fecha de consulta: [29 de marzo de 2023].
[28] Imran, Hadeel J.; Hubeatir, Kadhim A.; Al-Khafaji, Mohanned M. "*CO2 laser micro-engraving of PMMA complemented by Taguchi and ANOVA methods*". Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021. p. 012062.
[29] JustLaser. (s.f.). "*Laser Engraving Jewellery*". Recuperado de https://www.justlaser.com/en/laser-applications/laser-engraving/laser-engraving-jewellery/. Fecha de consulta: [29 de marzo de 2023].
[30] LaserStar Technologies. (s. f.). "*Jewelry Laser Engraving*". Recuperado de https://laserstar.net/en/industries/jewelry/jewelry-engraving/. Fecha de consulta: [29 de marzo de 2023].
[31] Gravotech. (s. f.). LW2. https://www.gravotech.mx/productos/estaciones-de-marcado-laser/lw2#section-5/. Fecha de consulta: [29 de marzo de 2023].
[32] Hans Laser. (s. f.). Fiber Laser Marking Machine. https://www.hanslaser.net/product_detail/id-51.html. Fecha de consulta: [29 de marzo de 2023].
[33] Gravotech. (s. f.). Welase. https://www.gravotech.mx/productos/estaciones-de-marcado-laser/welase. Fecha de consulta: [29 de marzo de 2023].
[34] Mott, Robert L., et al. "*Diseño de elementos de máquinas*". 2006.
[35] Groover, Mikell. "*Fundamentos de manufactura moderna*". Tercera edición. Ed. México, DF: Mc Graw Hill, 2007.
[36] Robotic Industries Association, 2020, "*Robot Terms and Definitions*". https://www.robotics.org/product-catalog-detail.cfm/Robotic-Industries-Association/Robot-Terms-and-Definitions/productid/2953. Fecha de consulta: [29 de marzo de 2023].
[37] Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., & Oriolo, G., "*Kinematics*", Robotics: modelling, planning and control, pp. 73–75, 2010, Springer Science & Business Media
[38] Reyes, F., "*Cinemática de robots manipuladores*", Robótica. Control de robots manipuladores, pp. 203, 2012, Alfaomega Grupo editor.
[39] Reyes F., "*Dinámica de robots manipuladores*", Robótica. Control de robots manipuladores, pp. 253, 2012, Alfaomega Grupo editor.
[40] Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M., "*Dynamics*", Robot modeling and control, pp. 165, 2020, John Wiley & Sons
[41] Yañez-Badillo, H., Tapia-Olvera, R., Beltran-Carbajal, F., Aguilar-Mejia, O., & Lopez-Garcia, I. "*Modelado Matemático y Control PD de un Quadrotor*". Difu100ci@, Revista de difusión científica, ingeniería y tecnologías, 2016, vol. 10, no 1, p. 19-27.
[42] Yañez-Badillo, H.; Tapia-Olvera, R.; Beltran-Carbajal, F. "*Adaptive Neural Motion Control of a Quadrotor UAV*". Vehicles, 2020, vol. 2, no 3, p. 468-490.
[43] Galvan-Perez, D., Yañez-Badillo, H., Beltran-Carbajal, F., Rivas-Cambero, I., Favela-Contreras, A., & Tapia-Olvera, R. "*Neural Adaptive Robust Motion-Tracking Control for Robotic Manipulator Systems*". Actuators. MDPI, 2022. p. 255.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 27, pp. 350 – 365
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Implementación de un Sistema SLAM Multi-Agente para 2 Robots Humanoides Tipo DARwIn-OP 1

Rangel Martínez Miguel Fernando, García Robles Víctor Daniel, Cortez Vega Ricardo Alan, González Navarro Yesenia Eleonor

Instituto Politécnico Nacional-UPIITA México
mrangelm1700@alumno.ipn.mx, vgarciar1704@alumno.ipn.mx

Resumen

Los sistemas multi-agentes son aquellos que incorporan múltiples entidades que han sido entrenadas para responder ante una situación en su entorno mediante el mapeo y localización simultánea (SLAM) dando solución a un problema de alto nivel que, si se resolviera de manera individual, tomaría mucho tiempo o coste computacional. El uso de estos sistemas es cada vez más frecuente en robots y vehículos autónomos. Debido a su eficiencia es que se propone diseñar e implementar un sistema multi-agente para operar con robots humanoides tipo DARwIn-OP1. El trabajo propuesto considera la actualización del sistema de visión mediante una cámara estereoscópica con sensor de profundidad, así como una actualización del controlador de la plataforma DARwIn-OP1 mediante una tarjeta NUC10i7FNB de Intel, con el propósito de mejorar su interfaz y su desempeño. El sistema multi-agente se implementa en un sistema embebido, donde se podrá generar una interconexión entre robots usando una red Wi-Fi para transmitir la información del entorno y generar trayectorias óptimas para su recorrido.

Palabras clave: DARwIn-OP, Multi-Agente, SLAM, Visión Estereoscópica.

1. Introducción

Los sistemas de transporte, los robots de servicio, la exploración de lugares peligrosos, o el rescate en situaciones de desastres naturales son ejemplos en los que se puede implementar sistemas multi-agentes. El resultado de dividir un problema en varias tareas a resolver, es algo que realizamos los humanos día con día, y con ello, nos damos cuenta que los beneficios de hacer tales sistemas son enormes. La construcción de estos sistemas requiere la integración de muchas disciplinas como la teoría de control, la visión artificial, la robótica, sistemas embebidos, tecnologías de la información y la comunicación, etc.

Cada agente dentro del sistema tiene una inteligencia local y comunicación mutua para superar una percepción errónea o un mal funcionamiento, evaluar estos sistemas complejos no es una tarea fácil. La complejidad de la evaluación de sistemas multi-agente viene dada por la dificultad actual de capturar el dinamismo del mundo real. Sin embargo, a nivel internacional se tienen algunos desafíos que juegan un papel importante en los primeros pasos de estas evaluaciones. Un ejemplo es el DARPA Grand Challenge: una carrera de vehículos terrestres autónomos a través de un terreno desértico [5]. Por otro lado, el desafío RoboCup pide probar la colaboración multi-agente mediante un encuentro en el que dos equipos de robots humanoides juegan un partido de fútbol de manera autónoma [1].

Dentro de la competencia RoboCup, una de las ligas emplea robots humanoides para conseguir ese trabajo colaborativo, de manera que, para lograr este objetivo, es necesario tener un procesamiento eficaz, así como una buena adquisición de la información del entorno, siendo una base para poder trascender este trabajo colaborativo a muchas otras aplicaciones. El presente trabajo inlcuye el rediseño de la plataforma DARwIn-OP 1 para poder realizar trabajos colaborativos mediante el mapeo de su entorno y la comunicación entre los diferentes agentes.

2. Desarrollo

En México, la implementación de tecnologías avanzadas y robótica se considera crucial para la cuarta revolución industrial en instituciones y empresas. En particular, los sistemas de SLAM están ganando presencia en la robótica autónoma debido a su capacidad para crear dispositivos cada vez más autónomos capaces de transportar personas a larga distancia.

Aunque la mayoría de los trabajos de investigación se han centrado en sistemas de un único agente debido a su simplicidad, el estudio de sistemas de SLAM multi-agente es fundamental para promover la industria y ofrecer soluciones técnicas viables. Los sistemas SLAM multi-agente también pueden fomentar la innovación y la actualización de plataformas existentes, lo que puede resultar en sistemas más robustos y con un mayor rango de aplicaciones.

Además, se ha observado que la auto-localización basada en el sistema de posicionamiento global (GPS) utilizada en plataformas móviles autónomas no siempre es apropiada para plataformas móviles que requieren una menor área de desplazamiento, ya que los GPS pueden tener un error de $\pm$ 3 [m]. Esto plantea un desafío para la implementación de SLAM tipo multi-agente en robots como el DARwIn-OP1, que requieren un sistema de auto-localización más preciso y escalable [2, 3].

La implementación de un sistema SLAM multi-agente basado en visión para el mapeo de un área delimitada como una cancha de juego e identificación de objetos en esa área, requiere la actualización del hardware utilizado en los robots DARwIn-OP1. Esto implica cambiar su procesador y cámara, lo que afecta el peso y la estructura del robot, y por lo tanto, la estabilidad necesaria para su locomoción. Por lo tanto, se propone un nuevo diseño para el robot DARwIn-OP1, que incluye la actualización del procesamiento y el sistema de visión, así como una alimentación de entre 10-15 [W].

Además, se realizará una modificación en el software para incorporar sistemas multi-agente para la comunicación de los robots humanoides, con especial atención en los parámetros de “asignación de tareas”, “localización relativa” y “representación de mapa”. La evaluación se realizará en la competencia RoboCup online, que es un escenario apropiado de evaluación para un sistema multi-agente.

Para comprobar la funcionalidad del sistema, se implementará en la plataforma física, donde se ratificará el tipo de SLAM a utilizar (pudiendo ser centralizado o no centralizado) y se comprobará la funcionalidad del robot. Posteriormente, se manufacturará la estructura del robot con las modificaciones correspondientes al torso, cabeza y al sistema multi-agente. Este proyecto representa un avance significativo en la aplicación de sistemas SLAM multi-agente en robótica y podría tener un impacto importante en el futuro desarrollo de robots autónomos para aplicaciones en diversos campos.

2.1. *Descripción de la plataforma DARwIn OP*

El DARwIn-OP, acrónimo de Dynamic Anthropomorphic Robot with Intelligence-Open Platform, es una plataforma robótica de tipo humanoide en miniatura con capacidades avanzadas de cómputo, sofisticados sensores, alta capacidad de carga y habilidades de movimiento dinámico que permiten

una amplia variedad de actividades de investigación, educación y divulgación. Esta plataforma es de software y hardware libre, lo que la hace altamente adaptable y personalizable. Ha sido utilizada en diversas aplicaciones, incluyendo la competición de fútbol en el torneo ROBOCUP, donde ha demostrado su superioridad al ser campeón en las categorías de los años 2011, 2012 y 2013.

Además, se utiliza en investigación avanzada en robótica y en aplicaciones como robot social y terapéutico. El DARwIn-OP cuenta con conectividad WiFi, USB, HDMI y Ethernet, un procesador Intel Atom Due Core de 2014, actuadores DYNAMIXEL y puede operar bajo el sistema operativo Linux o Windows. Se puede programar mediante ROS, la suite de programas gratuita ROBOPLUS, o LabVIEW. También es posible programar y utilizar la plataforma de forma simulada mediante la plataforma Webots.

2.2 SLAM

La técnica conocida como localización y mapeo simultáneo (SLAM, por sus siglas en inglés) surge de la necesidad de que un robot pueda determinar su ubicación en un entorno desconocido. Para lograr esto, el robot debe responder tres preguntas auto-referenciales: “¿Dónde estoy?”, “¿A dónde voy?” y “¿Cómo llego allí?”. En ausencia de puntos de referencia iniciales, el robot debe crearlos a medida que explora su entorno. La calidad de un mapa generado mediante SLAM es tan buena como la precisión de la estimación de la posición actual del robot. En comparación con otras técnicas SLAM que utilizan sensores LiDAR, los sistemas SLAM visuales emplean cámaras de video, que suelen ser livianas, económicas y proporcionan información visual detallada, lo que los hace más adecuados para plataformas con bajo costo y carga útil limitada [12].

2.2.1 Sistemas multi-agente para SLAM

Los sistemas de agentes múltiples han sido utilizados en una variedad de campos como la robótica, la inteligencia artificial, la economía y la ciencia social. Estos sistemas pueden ser utilizados en una amplia gama de aplicaciones, desde la automatización de fábricas hasta la exploración espacial y la atención médica. Al usar agentes múltiples, las tareas pueden ser distribuidas de manera eficiente y se pueden obtener soluciones más rápidas y precisas. La clasificación de los sistemas de agentes múltiples según su manera de procesar la información es esencial para determinar qué tipo de sistema es el más adecuado para una tarea en particular. Los sistemas centralizados son ideales para tareas con una estructura jerárquica clara, mientras que los sistemas descentralizados son útiles para tareas que requieren una mayor capacidad computacional y que deben ser más flexibles. Los sistemas distribuidos son la opción preferida para tareas que requieren robustez y tolerancia a fallas. Al comprender las diferentes categorías de sistemas de agentes múltiples, se puede elegir el tipo de sistema más adecuado para una tarea en particular y optimizar la eficiencia y precisión del sistema en su conjunto [8].

3 Actualización de robot humanoide

La plataforma original cuenta con una computadora Fit-PC2i, equipada con un procesador Intel Atom Z530, 1 GB de memoria RAM y un disco duro de 3.6 GB. Su consumo de energía es de 5 a 7 W. Además, cuenta con una cámara HD USB de 2 MP de Logitech C905 para la visión. Así mismo, la plataforma cuenta con una tarjeta controladora CM-730 con acelerómetro y giroscopio. Sin embargo, debido a la limitación en el procesamiento y visión, se dificulta la implementación de algoritmos complejos.

Para conseguir un sistema multi-agente es necesario cambiar la tarjeta de procesamiento por una NUC Intel NUC10i7FNB, ajustando la alimentación de la plataforma y reemplazar la cámara Logitech por una RealSense D415. Al modificar el sistema habrá un cambio en las dimensiones y peso de la plataforma, por lo que se necesita realizar un nuevo diseño tanto en esqueleto como en la cubierta de la cabeza y el torso. La manera en la que estos dispositivos se conectan entre sí para proporcionar información a la plataforma se muestra en la Figura 1. A su vez, la Figura 2 muestra la manera en que estos

subsistemas estarán conectados entre sí. El diagrama de bloques de la nueva plataforma se presenta en la Figura 3. Este diagrama muestra la implementación de los cambios y la conexión de todos los componentes para formar un sistema embebido.

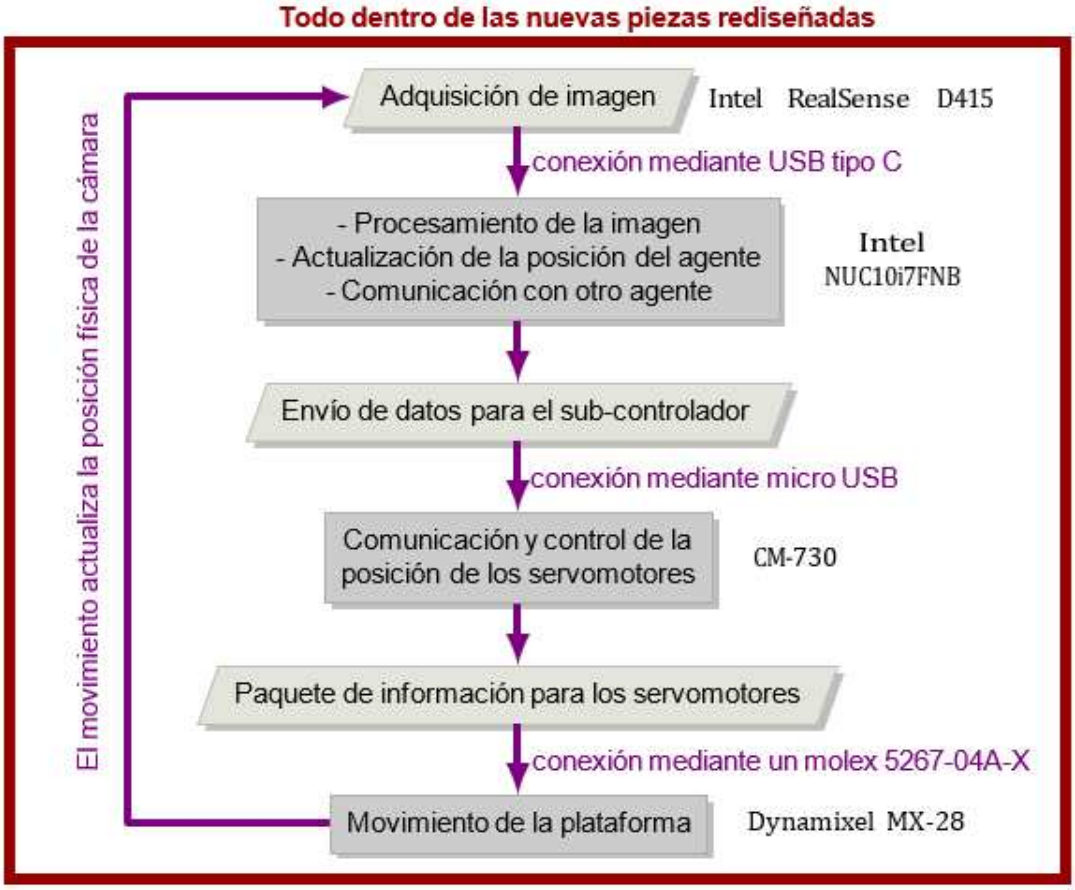


Figura 1: Subsistemas de la plataforma con entradas, salidas y tipos de conexión que tiene cada etapa de comunicación y procesamiento.

4. Desarrollo experimental

4.1 Rediseño y análisis de esfuerzos de la cabeza y soporte de la tarjeta

El rediseño comienza con la cabeza, ya que se requiere integrar la nueva cámara. Se procedió a tomar las dimensiones de la cámara y se realizó un modelo en SolidWorks, el cual se diseñó siguiendo la estructura del modelo original. Se creó un espacio en el diseño para que la cámara pudiera encajar y se añadieron los soportes para el esqueleto del robot, así como las ranuras que permitirían replicar el movimiento de extensión y flexión cervical del modelo original, este diseño se puede apreciar en la Figura 6.

Para la implementación de la nueva tarjeta de procesamiento, fue necesario rediseñar tanto la placa que aloja la tarjeta como la placa controladora de motores. En este proceso, se tuvieron en cuenta las dimensiones de la nueva placa, especialmente su altura, ya que superaba en aproximadamente el doble a la computadora original, aunque solo en unos pocos milímetros en ancho y largo.

Se mantuvo el diseño original para minimizar los cambios en el torso del robot, su diseño se muestra en la Figura 4. La chapa que contendría la placa controladora de motores se diseñó a partir de la pieza original, tomando en cuenta los espacios necesarios para los motores que actúan como articulación del hombro. Se modificó el ancho y largo de la placa para ajustarse a las dimensiones de la tarjeta NUC10i7FNB, como se puede apreciar en la vista isométrica de la Figura 5. De esta manera, se logró un rediseño de la plataforma del robot que permitió integrar la nueva cámara y la tarjeta de procesamiento sin modificar significativamente la estructura original del robot.

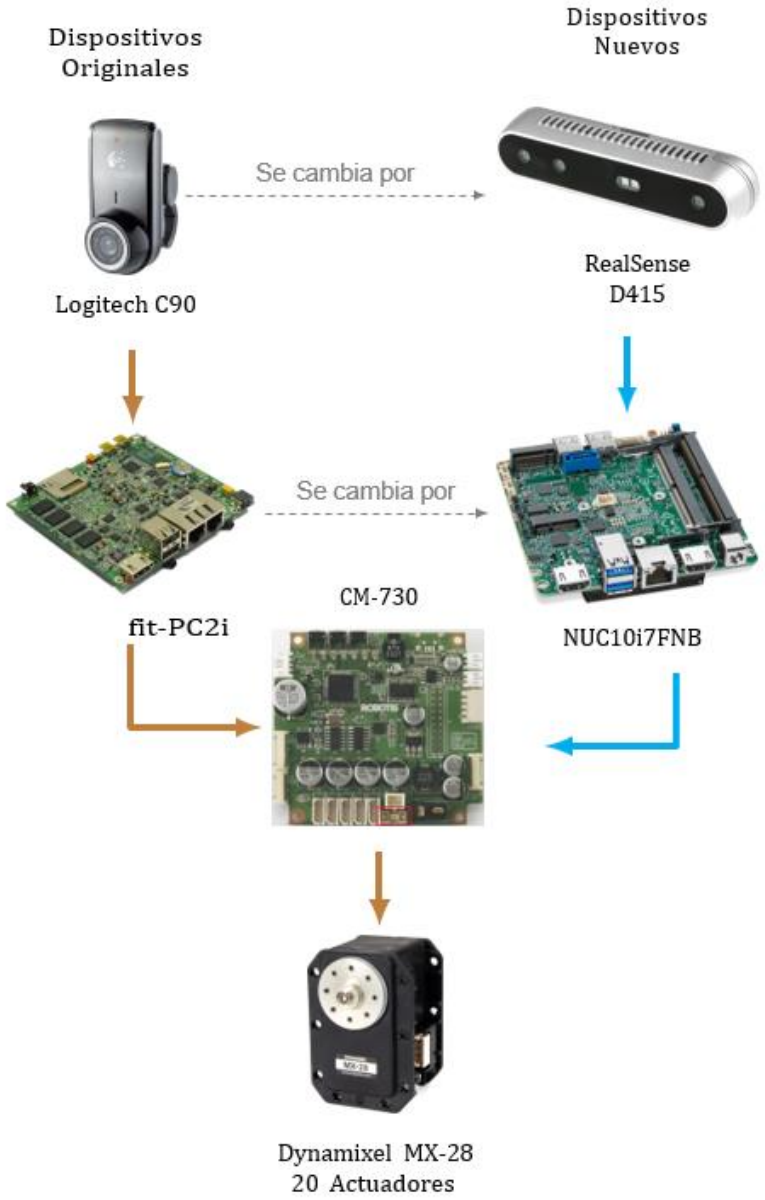


Figura 2: Actualización y conexión entre la cámara, unidad de procesamiento y actuadores de la plataforma.

4.2 Alimentación de la plataforma

Tras la implementación de los cambios en el controlador principal, se ha observado un aumento significativo en el consumo de energía en el sistema. En concreto, la NUC10i7FNB consume 120 [W] con una tensión de 19 [V], lo que resulta en una corriente de 6.3 [A] (120 [W] / 19 [V]) [9].

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 27, pp. 350 – 365
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Si sumamos los consumos de la tarjeta controladora principal, la tarjeta controladora de los motores y los motores, obtenemos un consumo total de 173 [W] (120 [W] + 51.2 [W] + 1.8 [W]). Este consumo plantea un problema en términos de energía, ya que la corriente total asciende a 10.71 [A] (6.3 [A] de la NUC10i7FNB, 4.26 [A] de los 20 motores y 150 [mA] de la CM-730), lo que supone más del doble de la corriente de la solución anterior. Además, cada tarjeta funciona en diferentes rangos de tensión.

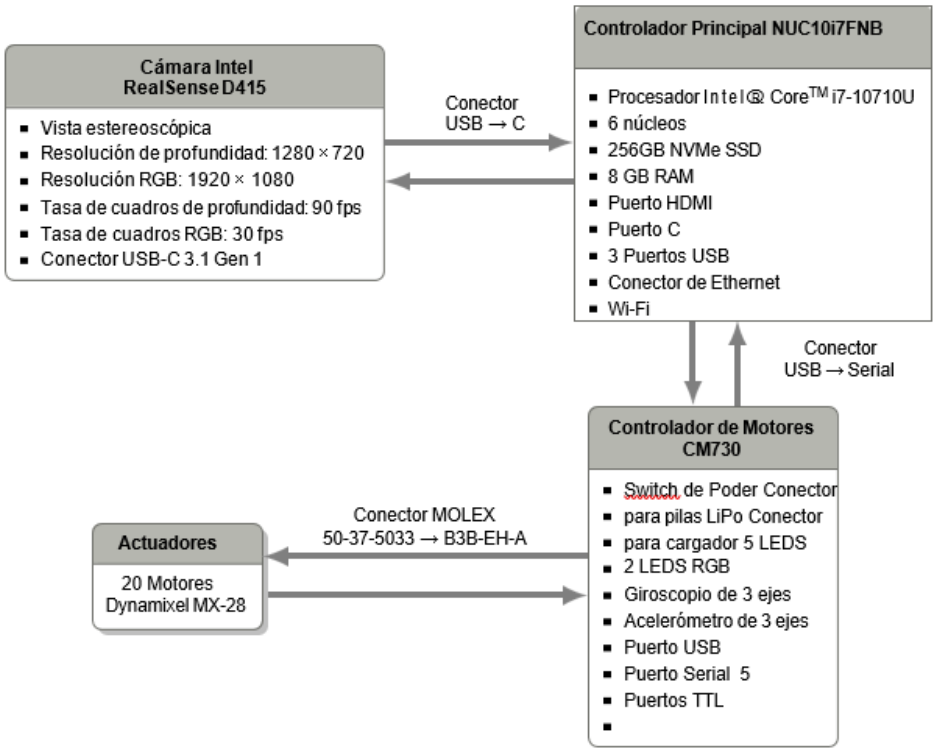


Figura 3: Características de los subsistemas de la plataforma con entradas, salidas y tipos de conexión que tiene cada etapa.

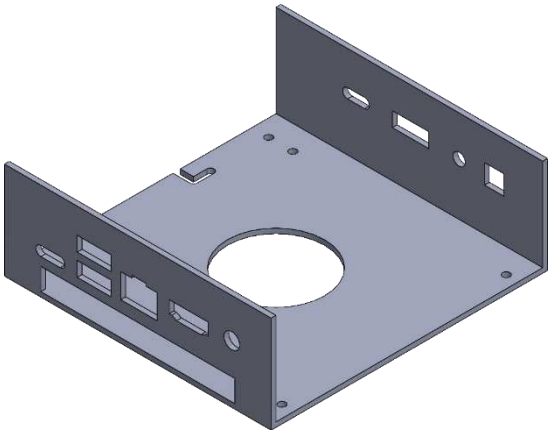


Figura 4: Diseño de la placa contenedora de la NUC10i7FNB.

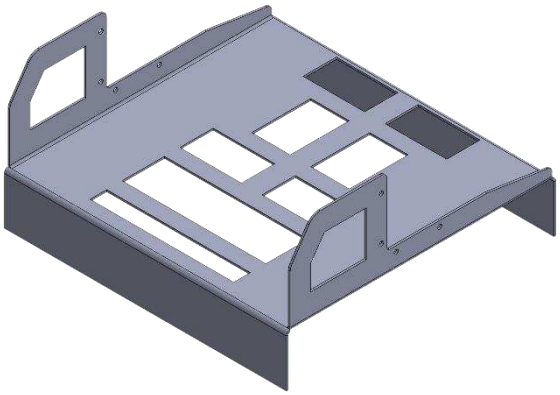


Figura 5: Diseño de la placa contenedora del controlador de motores.

Para solucionar el problema de la diferencia de tensiones en la plataforma, se implementó un regulador de voltaje de alta eficiencia, el U3V70A de Pololu, como se muestra en la Figura 8. Este dispositivo es un regulador de conmutación sincrónica de alta eficiencia y corriente diseñado para generar tensiones de salida más elevadas a partir de tensiones de entrada bajas. Con una entrada mínima de solo 2.9 [V], el U3V70A puede producir una tensión de salida de hasta 20 [V].

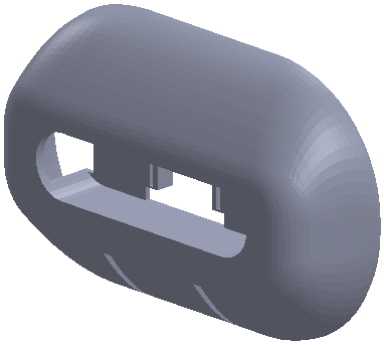


Figura 6: Vista isométrica frontal de la cabeza.

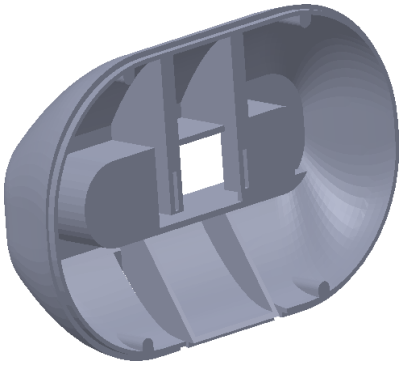


Figura 7: Vista isométrica posterior de la cabeza.

Es importante tener en cuenta que el regulador limita las corrientes de entrada instantáneas a 10 [A]. Esto significa que la corriente de entrada no puede superar los 8 [A] durante varios segundos antes de que se active la protección térmica y el dispositivo se apague. Por lo tanto, se recomienda precaución al utilizar este regulador para evitar dañar el dispositivo o provocar un mal funcionamiento en la plataforma [4]. El regulador de tensión eléctrico permite el uso de la plataforma con un solo cargador de una tensión mínima de 2.9 [V] y una corriente mínima de 10.71 [A], o alternativamente, baterías.

Para el uso de baterías, se seleccionaron baterías de polímero de litio debido a su mayor densidad energética y capacidad en comparación con baterías NiCd o NiMH, manteniendo el mismo peso y dimensiones. Además, tienen una tasa de descarga alta, que se describe por la magnitud C, lo que significa que una batería con una tasa de descarga de nC se puede descargar a un ritmo de n veces su capacidad.

Para nuestro proyecto, se ha hecho la adquisición de cuatro baterías, dos de ellas son las baterías SPARD YT5068, con una capacidad de 2100 [mAh], lo que indica que pueden descargarse completamente en una hora ante una demanda de 2.1 [A]; las otras dos baterías adquiridas son las SPARD YT5062, con una capacidad de 1300 [mAh], que pueden descargarse por completo en una hora con una demanda de 1.3 [A].

La elección de estas baterías se hizo en función de las necesidades de energía de la plataforma y su tiempo de operación, considerando las limitaciones de peso y espacio que se presentan en la estructura del robot.

4.3 ROS

El DARwInOP 3 es actualmente la única plataforma que viene con ROS de fábrica, aunque también es posible obtener una versión limitada para el DARwInOP 2 mediante algunas actualizaciones. Los paquetes necesarios se encuentran disponibles en diversos repositorios en línea, que se pueden descargar desde la página oficial.

Estos repositorios incluyen los ficheros para el DARwIn OP2[1] y para el DARwIn OP3[2]. Es importante copiar ambas carpetas de estos repositorios a la carpeta “src” del espacio de trabajo creado, ya que existen dependencias entre ellas. Una vez copiados los paquetes en el espacio de trabajo, se debe compilar e instalar utilizando los siguientes comandos desde la raíz de este.

```
$ catkin_make
$ catkin_make install
```

[1]github.com/ROBOTIS-GIT/ROBOTIS-OP2
[2]github.com/ROBOTIS-GIT/ROBOTIS-OP3

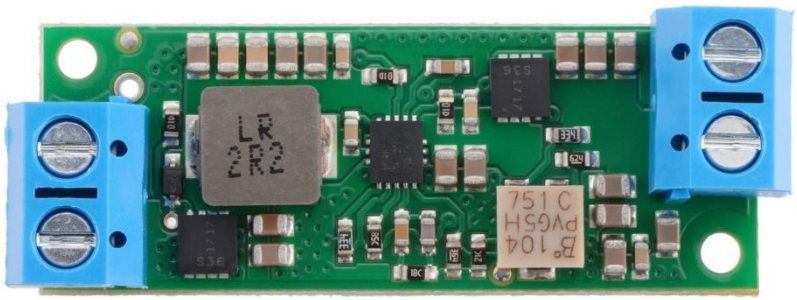


Figura 8: Conversor de tensión.

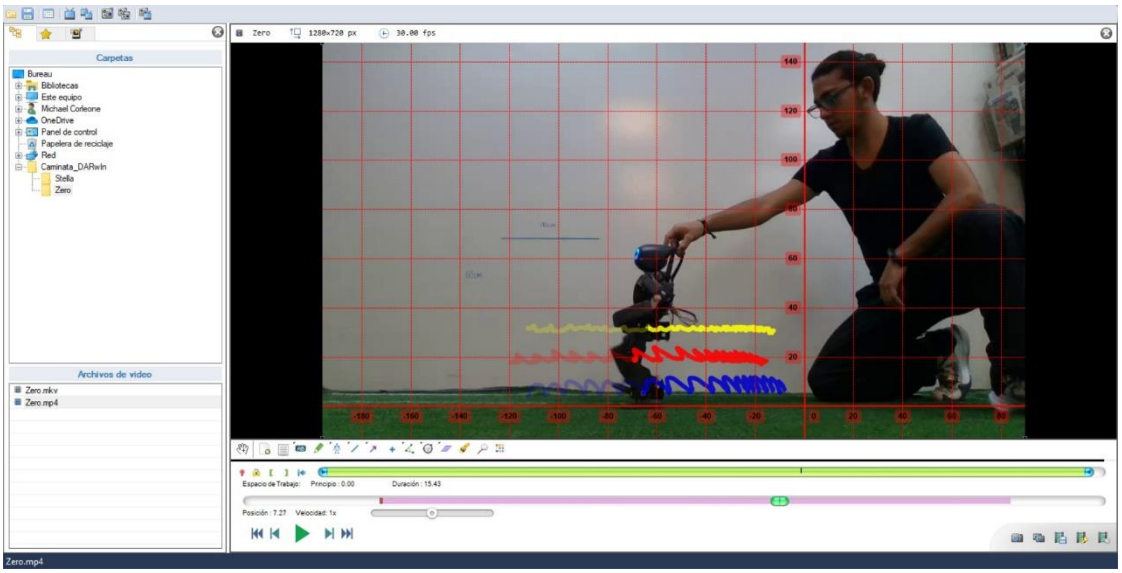


Figura 9: Análisis de marcha de la plataforma original.

Una vez instalados los paquetes, es necesario otorgar permisos al puerto serial para poder interactuar con la plataforma. Esto se logra a través de una terminal con permisos de administrador (root), desde donde también se debe iniciar el programa de ROS.

Es importante destacar que un usuario normal no tiene acceso a la manipulación de la información que se transmite a través de los puertos. Para realizar estos cambios y ejecutar el programa, se deben utilizar los siguientes comandos, los cuales deben ser ejecutados desde la raíz del espacio de trabajo creado para ROS.

```
$ sudo bash # Inicia el interprete de comandos como administrador
$ sudo chmod 666 /dev/ttyUSB0
$ source devel/setup.bash # Pone a disposicion los comandos disponibles
$ roslaunch op2_manager op2_manager.launch # Ejecuta el controlador del robot
```

La plataforma actual permite ejecutar una amplia gama de comandos para interactuar con ella. La versión 3 del robot DARwIn OP utiliza una tarjeta controladora OpenCR. Aunque esta tarjeta tenía las rutinas necesarias para operar, al intentar interactuar con la plataforma a través del mánager, la primera interfaz, no se producía movimiento, a pesar de que el programa lograba activar el torque en los motores.

Creemos que esto se debe a la gran cantidad de parámetros que reciben y envían los motores XM430-W350, así como a la necesidad de utilizar un adaptador U2D2 para controlarlos. Debido a esta situación, se decidió utilizar la tarjeta controladora original “CM-730” y trabajar con los programas desarrollados para la versión 2 de la plataforma.

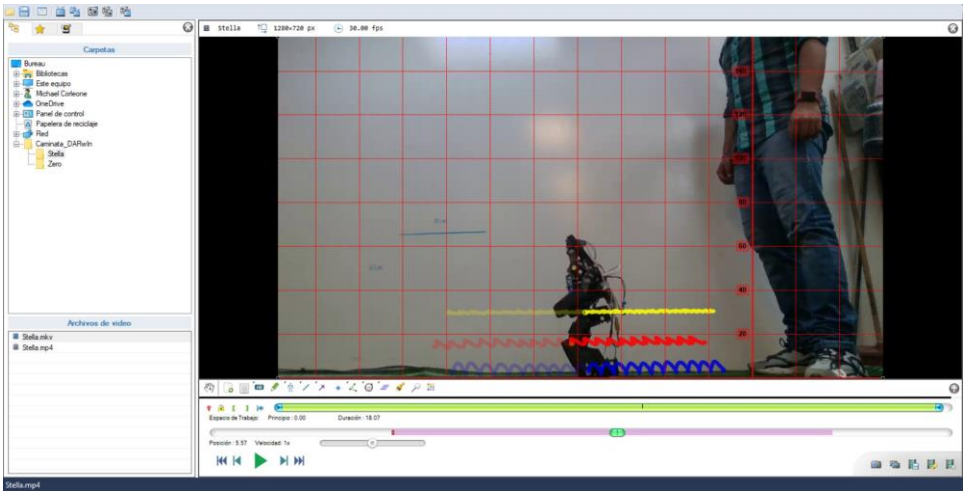


Figura 10: Análisis de marcha de la plataforma rediseñada.

4.4 Análisis de marcha original y rediseñado

Se realizó un análisis de la marcha del robot original utilizando el software Kinovea como plataforma única y estable para evaluar su caminata en diferentes partes del recorrido. Este análisis se utilizó como base para el rediseño, considerando el peso y tamaño de las nuevas piezas y dispositivos, y para que siguiera el patrón de caminata “original”. Además, se realizó una comparativa entre ambas plataformas para verificar los efectos del rediseño y las nuevas rutinas. Este análisis se llevó a cabo en condiciones más controladas con marcadores para emplear el software Kinovea como se aprecia en las Figuras 9 y 10.

4.5 Implementación del SLAM

Se realizaron pruebas comparativas entre dos sistemas de localización y mapeo simultáneo (SLAM): RTAB-Map (Figura 11) y uno que realiza el modelado de trayectorias de un robot humanoide mediante visión artificial [11] (Figura 12). En este trabajo, se utilizó y adaptó el sistema desarrollado para el modelado de trayectorias pues ya incorpora el sistema SLAM y la detección de objetos. Los detalles sobre los pasos necesarios para su instalación y uso se encuentran disponibles en el manual del desarrollador [6] y en el manual del usuario [7], ambos de los cuales son gestionados por los autores del sistema.

4.6 SLAM Multi-agente

El proyecto en cuestión tiene como objetivo establecer un sistema multi-agente entre dos robots humanoides, el rediseñado y el original. Para lograr una comunicación efectiva entre ambos robots se utiliza un sistema WLAN, generado a través de un dispositivo móvil para facilitar la comunicación. Sin embargo, la ejecución de este programa requiere algunos pasos previos para garantizar que la comunicación sea exitosa.

Es necesario instalar la biblioteca “spur” y tener acceso a la dirección IP y contraseña del robot original. Se accede como usuario root para obtener privilegios de administrador y poder utilizar los programas de manera directa. Además, para completar la comunicación, es necesario agregar las líneas de código específicas que se muestran en la parte inferior del programa.

```
import spur
comando = "yes | sudo /darwin/Linux/project/tutorial/ball_following/ball_following"
shell = spur.SshShell(hostname="192.168.43.212", username="root", password="123")
result1 = shell.run(["sh", "-c", comando])
```

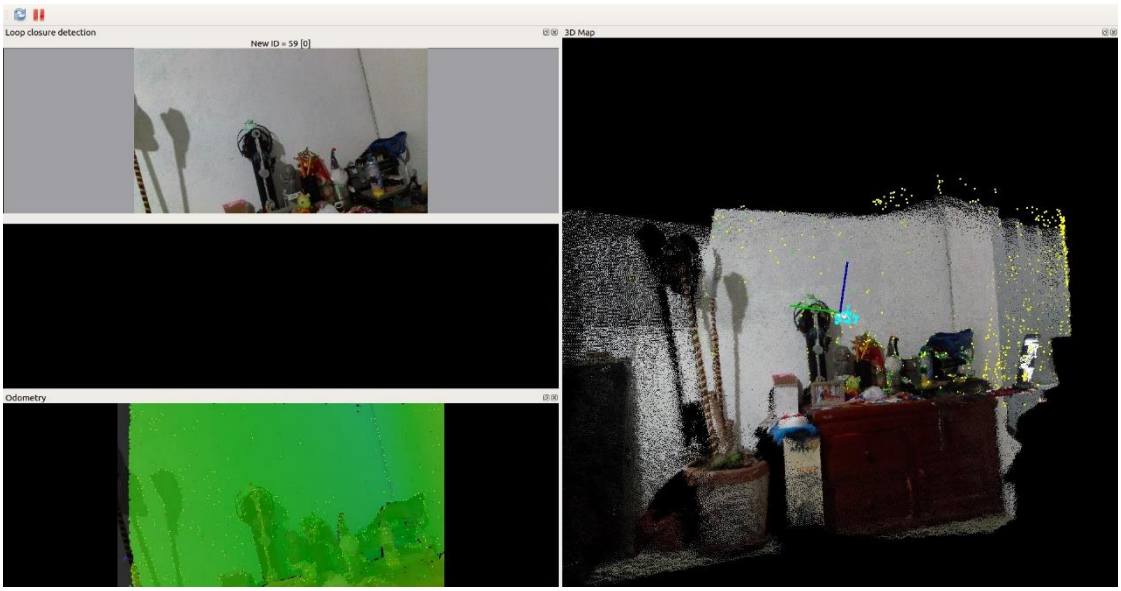


Figura 11: SLAM realizado con RTAB Map.

Figura 12: SLAM especializado en la detección de objetos y modelado de trayectorias.

En la primera versión del sistema multi-agente, se implementó un enfoque descentralizado y distribuido en el que cada robot humanoide se encargar de adquirir y procesar información de su entorno para llevar a cabo tareas específicas. El rediseñado mapea su entorno, reconoce y evade obstáculos, identifica y alcanza el balón, realiza un pase al robot original y envía una señal de activación. El robot original se enfoca en visualizar su entorno, buscar el balón y desplazarse hasta él.

En la segunda versión del sistema multi-agente, se optó por un enfoque centralizado y no distribuido en el que solo el robot rediseñado, adquiere y procesa la información. A su vez, lleva a cabo las mismas tareas que en la primera versión, pero en lugar de hacer un pase al robot original, ejecuta un tiro y envía instrucciones a éste para que replique la trayectoria del tiro con mayor velocidad.

El robot original no visualiza el entorno ni busca el balón, simplemente sigue las instrucciones recibidas para completar la tarea y envía mensajes sobre su conclusión. En ambos casos el robot rediseñado es el agente principal, encargado de iniciar la caminata y el pateo, así como de enviar las indicaciones necesarias al robot original.

Se implementó un fragmento de código en el programa de control del robot para realizar la rutina de caminata y otro en el programa encargado de realizar el mapeo para así generar la acción de patear y el envío de información, encargado de mostrar el mapa y generar los mensajes para la ruta y la conclusión del recorrido. Para el primer caso, el programa SLAM solo requirió una modificación menor, mientras que en el segundo caso se necesitó una gran optimización en tiempo y recursos, lo que implicó una modificación significativa. En cuanto al robot original, su programa principal (main.cpp) desarrollado en C++ se actualizó solo en el segundo caso, ya que en el primero se requiere el programa original.

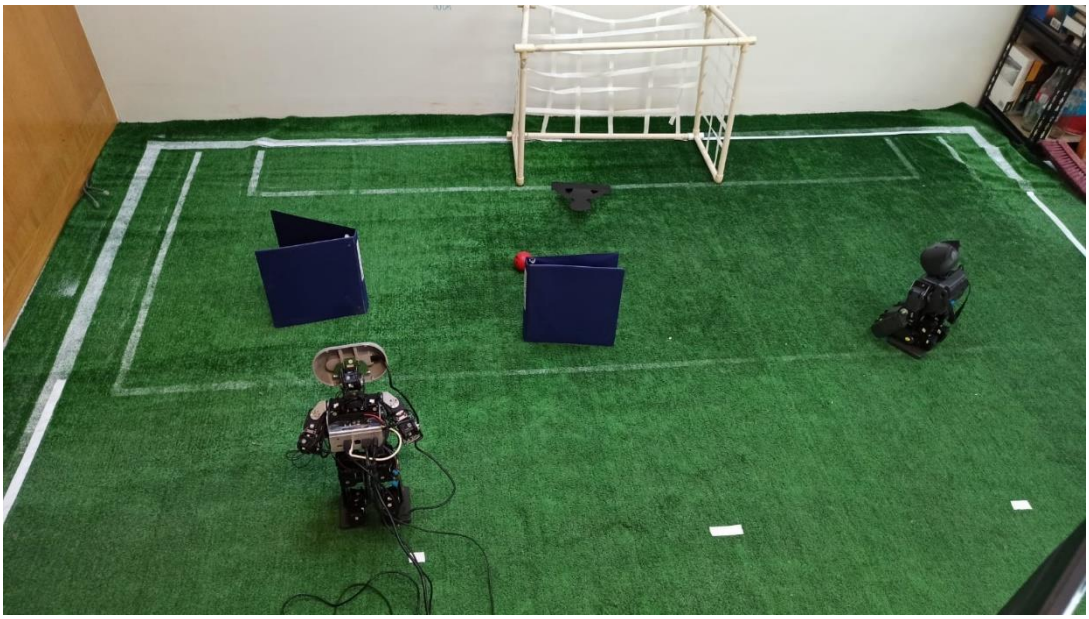


Figura 13: Escenario para el evento Penalty Kick.

Con el fin de mejorar la eficiencia y el funcionamiento del SLAM centralizado no distribuido, se incorporó una nueva característica al inicio del programa, que exige proporcionar las instrucciones para la ruta que debe seguir el robot.Estas instrucciones se dividieron en diferentes casos para una mejor gestión y seguimiento. Además, se llevaron a cabo algunas mejoras en la caminata del robot, ajustando los parámetros correspondientes y agregando la acción de patear. Para optimizar aún más el sistema, se decidió eliminar la cámara, el seguimiento de balones y la identificación de color. Todos

estos cambios se pueden visualizar en el anexo. Los experimentos se llevaron a cabo en un campo de juego con pasto sintético.

La configuración del experimento sigue las reglas de RoboCup para el evento Penalty Kick [10]. En este experimento, el robot rediseñado se coloca en una marca frente a varios obstáculos, incluyendo un balón, una portería y un portero. En el primer caso de multi-agente, el robot original se sitúa en el lado derecho del rediseñado para recibir un pase. En el segundo caso de multi-agente, el robot original comienza en la misma posición que el rediseñado y luego patea hacia la portería. Un ejemplo que contempla ambos escenarios se ilustra en la Figura 13. Se llevaron a cabo múltiples repeticiones de cada escenario para garantizar la fiabilidad y comparabilidad de los resultados.

5 Resultados

Para la creación de la plataforma final mostrada en la Figura 16, se utilizaron piezas fabricadas con aluminio. En particular, las Figuras 14 y 15 muestran el roscado de la chapa del controlador principal y su ensamble en la plataforma. Cabe destacar que la pieza que representa la cabeza de la plataforma también fue impresa en su versión final, con la cámara integrada. Estos procesos de fabricación permitieron la creación exitosa de la plataforma final.

Se realiza una comparación entre las rutinas de caminata, la comparativa se muestra en las Figuras 17 y 18. El sistema SLAM implementado tiene como función principal identificar y reconocer diferentes elementos en el escenario, como obstáculos, la portería y el balón, en un ambiente de juego de fútbol. Para lograr esto, el sistema analiza la información recolectada por la cámara del robot.

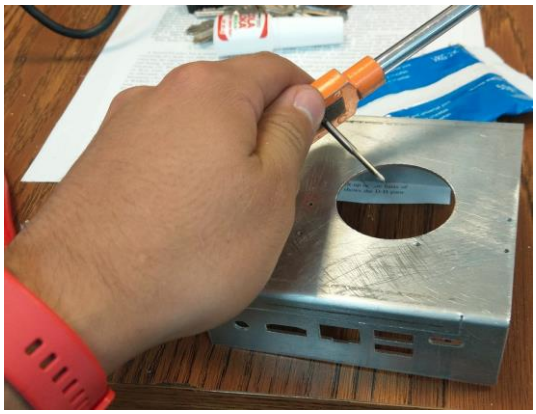


Figura 14: Roscado de la chapa para el controlador principal.

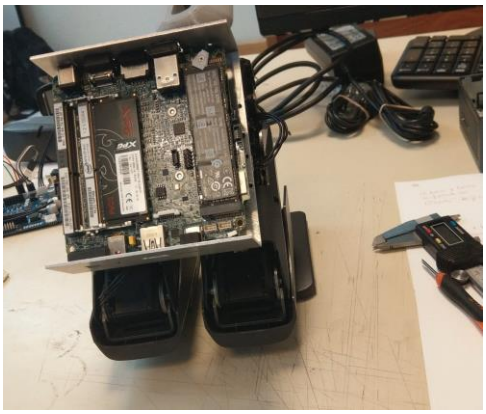


Figura 15: Ensamble de la chapa en la plataforma.

Figura 16: Diseño final de la plataforma rediseñada.

Una vez que se identifican los elementos en el escenario, el sistema puede trazar una ruta óptima hacia la portería o el balón y seguirla de manera autónoma utilizando técnicas de planificación de trayectorias. Además, el robot proporciona al usuario una representación visual de la toma de la cámara, la segmentación e identificación de los elementos y un mapa de los obstáculos, la portería y el balón en el escenario. Este mapa se actualiza en cada posición marcada, lo que ayuda al usuario a entender mejor el entorno y la ruta que está tomando el robot.

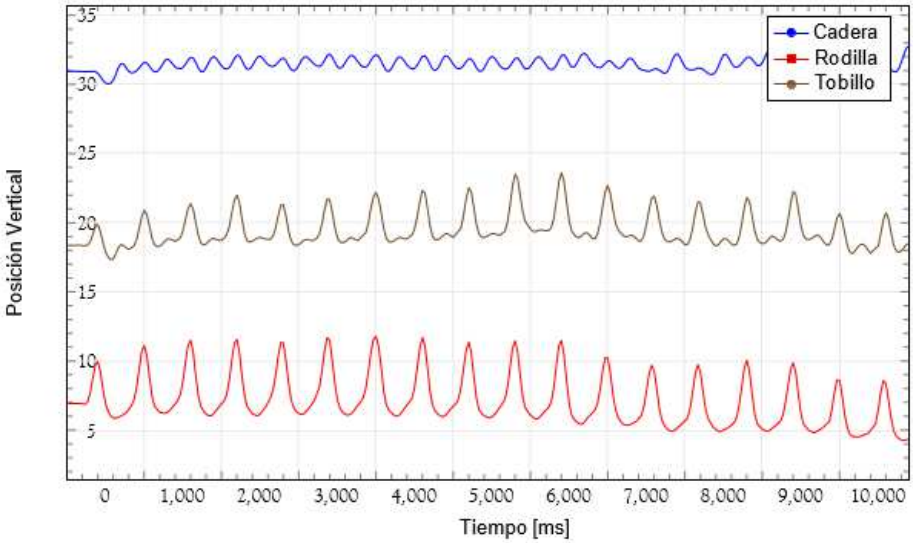


Figura 17: Gráfica de posición de la plataforma original.

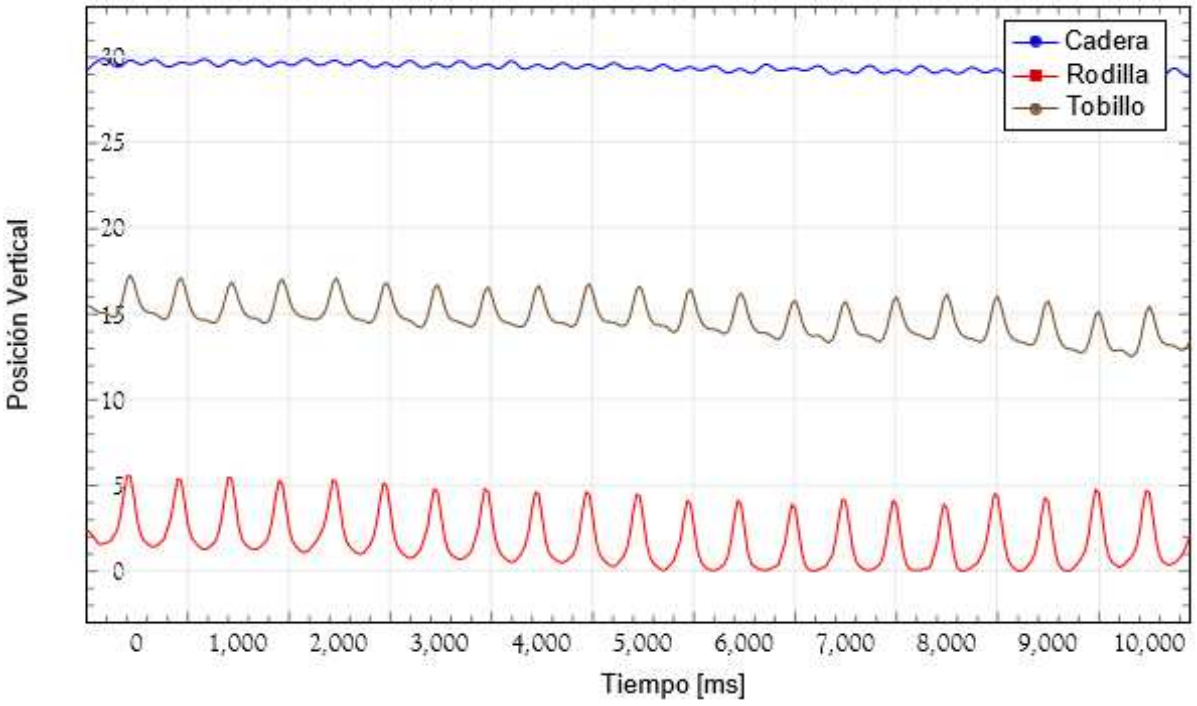


Figura 18: Gráfica de posición de la plataforma rediseñada.

En cuanto a la prueba de pase entre los robots rediseñado y original, esta demostró la capacidad de interacción y coordinación entre ambos robots. Durante la primera prueba, se observó que el robot rediseñado es capaz de evadir obstáculos, mapear su entorno, llegar al balón y realizar un pase al robot original. El robot original recibió la información compartida y persiguió la pelota con éxito.

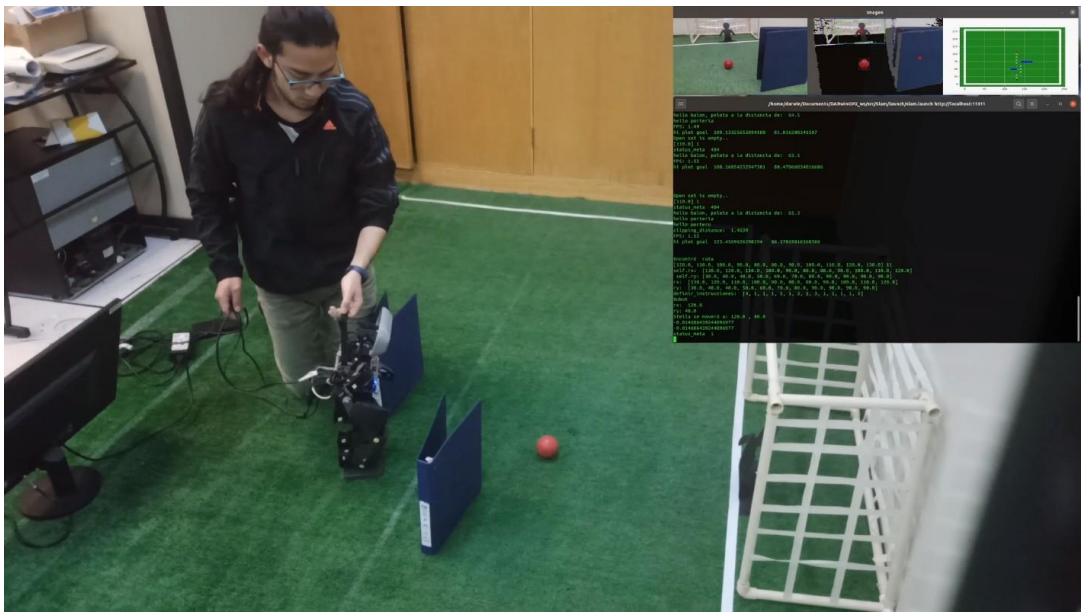


Figura 19: Ejecución del sistema SLAM desde ROS.

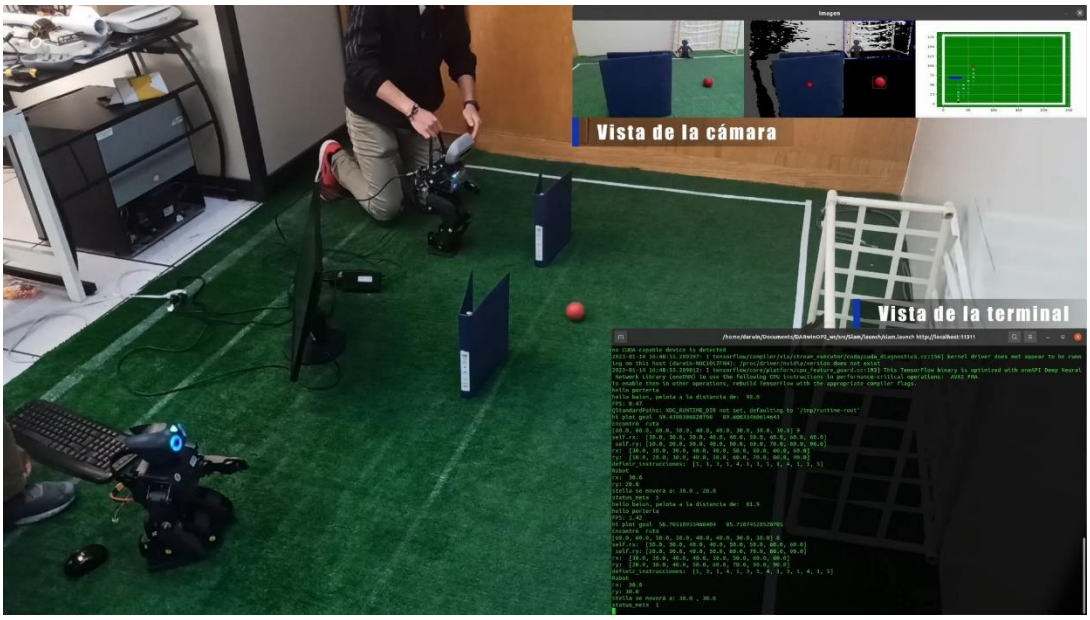


Figura 20: Ejecución del sistema SLAM Multiagente desde ROS.

Durante la primera fase de pruebas, se estableció un flujo unidireccional de información desde el robot rediseñado hacia el original. Sin embargo, en algunas ocasiones, el pase no era preciso, lo que provocaba que el robot original no pudiera recibir la pelota a tiempo. En contraste, en la segunda fase se logró una mejora significativa en el tiempo de procesamiento y se estableció una comunicación bidireccional entre ambos robots, lo que permitió completar la tarea con éxito.

Durante las pruebas, se pudo observar cómo el robot rediseñado procesaba toda la información y la transmitía al robot original, el cual recreaba el trayecto sin demora, lo que permitió una ejecución más rápida al evitar procesamiento adicional por parte del robot original. Los resultados finales indican una notable mejora en la estabilidad del modelo rediseñado en comparación con la versión anterior.

A pesar de que ambos robots no fueron diseñados específicamente para operar en superficies de pasto sintético, el robot rediseñado logró desempeñarse de manera destacada. Sin embargo, se requiere un sistema de sujeción para prevenir daños en el robot durante el proceso. En general, los resultados de la prueba de pase de balón demuestran la capacidad de los robots para interactuar, comunicarse y coordinarse eficientemente entre sí.

6 Conclusiones

El presente trabajo ha logrado modernizar un robot humanoide que había quedado en desuso, con el objetivo de generar un impacto económico y ecológico positivo en la sociedad. Se implementó un sistema SLAM multi-agente, el cual incluye mejoras en la visión, alimentación y tarjeta de desarrollo de la plataforma. A pesar de las limitaciones de recursos y tiempo, la selección de recursos y el diseño de la estructura fueron adecuados y comprobados con software de simulación y análisis.

La manufactura y armado fueron puestos a prueba con una nueva caminata que demostró ser más estable que una plataforma anterior, gracias a la incorporación de nuevos parámetros que brindan mayor control en el movimiento de la plataforma. La implementación del sistema SLAM multi-agente

se logró gracias a las mejoras en la visión y procesamiento, y se evaluó positivamente en escenarios de prueba de acuerdo con las reglas de torneos internacionales, lo que muestra la utilidad del prototipo actualizado.

Si bien se logró mejorar la estabilidad del robot, se observa la necesidad de optimización en la autonomía y el desarrollo de un sistema de control para superar desafíos más demandantes en cualquier superficie. Asimismo, se considera importante seguir trabajando en la capacidad de interacción, comunicación y coordinación eficiente entre los robots para mejorar su funcionamiento en conjunto.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP) del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo a este trabajo a través del proyecto SIP20220835.

Referencias

[1] “Objective” (2021) www.robocup.org/objective
[2] “SparkFun GPS-RTK-SMA Breakout - ZED-F9P” (2021) www.sparkfun.com/products/16481
[3] “SparkFun GPS-RTK2 Board - ZED-F9P” (2021) www.sparkfun.com/products/15136
[4] “4.5 – 20V Fine-Adjust Step-Up Voltage Regulator U3V70A” (2022) www.pololu.com/product/2890
[5] “The Grand Challenge” (2022) darpa.mil/about-us/timeline/-grand-challenge-for-autonomous-vehicles
[6] Alonso P, Reyna S. “Modelado de trayectorias de un robot humanoide mediante visión artificial”. Manual del Desarrollador (2021)
[7] Alonso P, Reyna S. “Modelado de trayectorias de un robot humanoide mediante visión artificial”. Manual de Usuario (2021)
[8] Anderson J. “Humanoid Multi-robot Systems” (2018) 10.1007/978-94-007-7194-9_140-1
[9] Campbell S, Krpalkova L, Riordan D, Walsh J, Murphy A, Ryan C. “IntelQR NUC Products
[10] NUC10i3FN/NUC10i5FN/NUC10i7FN. Technical Product Specification” (2021) www.intel.com/content/dam/support/us/en/documents/intel-nuc/NUC10i357FN_TechProdSpec.pdf
[11] Gallant G, Moreno J, Sugiura H, Dankel M, Martins F., Šuppa M, Nomura T, Riley J, Arani M, Moreno J, Martins F, Šuppa M. “RoboCupJunior Soccer Rules 2021” cdn.robocup.org/junior/wp/2020/ 10/2021_Soccer_Rules_final01.pdf
[12] Machado J. Modelado de trayectorias de un robot humanoide mediante visión artificial. Master’s thesis, Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional Interdisiciplinaria en Ingenieria y Tecnologías Avanzadas (UPIITA-IPN) (2021)
[13] Zou D, Tan P. “CoSLAM: Collaborative visual SLAM in dynamic environments”. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 35, pp. 354–366 (2013) 10.1109/TPAMI.2012.104

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 28, pp. 366 – 376
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Diseño y construcción de un prototipo a escala de un robot móvil autónomo

Reveles Martínez Rafael[1], Domínguez Sánchez Sergio[1], Flores Pinedo Rafael[1],Dávila Martin del Campo Jesús[1], Alcalde Navarro Julio[1], Celaya Padilla José María, Luna García Huizilopoztli

[1] Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas.,Zacatecas, México
Correo: rrevelesm@jpn.mx

Resumen

El objetivo de este proyecto es desarrollar un prototipo de robot móvil autónomo terrestre con capacidad de desplazamiento mediante un sistema de captación y procesamiento de imágenes, utilizando una cámara web como elemento transductor y sensores ultrasónicos. El robot adquiere fotogramas del entorno y de una pista, realiza un análisis de obstáculos, superficies y objetos que puedan interferir en su trayectoria. Se busca que el robot tenga una capacidad de carga de 20 kg y unaautonomía de 60 minutos por cada ciclo de carga y descarga de la batería. Además, se proyecta implementar un modo de teleoperación para agilizar el proceso de captación de fotogramas y generar una base de datos para el entrenamiento de modelos de aprendizaje. Se presenta el modelo del robot, junto con sus componentes principales y los resultados de las simulaciones, que evidencian que el prototipo cumple con los requisitos de carga establecidos en las pruebas.

Palabras clave: Robot autónomo, terrestre, obstáculos, trayectoria, captación, autonomía, cámara web,sensores ultrasónicos.

1. Introducción

Los algoritmos de aprendizaje profundo se emplean en una jerarquía, de la cual depende su complejidad y extracción, en estos se aplica una transformada no lineal en su entrada y conforme a lo que ha aprendido crea un modelo de salida estática. En estos modelos aprenden por su cuenta y por lotanto se pueden hacer relaciones entre las variables. Durante la aplicación de esta técnica la participación humana es casi nula, ya que los modelos son capaces de hacer una selección de características ideales para poder realizar la toma de decisiones mediante lo aprendido [1].

Un robot móvil autónomo mediante su sistema de navegación genera un mapa con los sensoresque posee, por lo que podrá aprender la ruta que tiene que recorrer, o por medio del software se realizauna carga de dibujos del área en la cual va a trabajar planteando rutas predeterminadas, logrando así una mayor movilidad durante el traslado de materiales. Tomando como referencia lo planteado se permite optimizar la planificación del transporte de recursos. Mediante el paso del tiempo se han desarrollado varias capacidades gracias a la inteligencia artificial, con la que se tiene la capacidad de distinguir obstáculos, personas, su estación de llegada y así poder tener una reacción eficiente al momento de tomar decisiones en su actuación.

Estos dispositivos otorgan una alta flexibilidad debido a que en los vehículos guiados tradicionales se observan limitantes respecto a su dependencia de una ruta estricta que se encuentra integrada en las instalaciones. Por lo que sus actividades tienden a ser reducidas y realizan la misma tarea durante su vida útil [2].

La inteligencia artificial se define como la habilidad de las máquinas para usar algoritmos con losque puedan memorizar información y utilizar lo aprendido para la toma de decisiones, como es el casocon los humanos. Pero a diferencia de los humanos, las máquinas no requieren

de un descanso, además de poder analizar un gran volumen de información. Asimismo, la proporción de los errores es significativamente menor en las máquinas que realizan la misma tarea siempre en comparación de unapersona [3]. Algunas de las contrapartes de la inteligencia artificial es la variación que se presenta según la aplicación para la cual se fue diseñada, además de que al intentar recrear el razonamiento humano puede presentar diferentes capas y neuronas en las redes neuronales.

Al utilizar estas técnicas de aprendizaje en sistemas, máquinas, ordenadores, etc., se permite realizar tareas con una respuesta inmediata, ya que la forma de analizar los datos se ejecuta con una mayor velocidad en comparación con una persona, por lo que se debe de ser más consciente con la inteligencia artificial, para obtener un mayor aprovechamiento de estas técnicas que brindan la posibilidad de agilizar y apoyar en las actividades que se realizan.

El uso de la visión artificial ha crecido demasiado, ya que en la actualidad permite realizar comoel control de calidad de algún objeto, detectar cosas de un cierto color, estas posibilidades que nos brinda la visión artificial han incrementado la demanda de aplicaciones en diversos sectores de las industrias, para así optimizar o automatizar sus procesos, igualmente se empieza a observar avances de esta herramienta en la medicina [4].

Los vehículos autónomos nacen de la necesidad de crear carros que sean capaces de tener unatoma de decisiones autónoma en pro de resguardar la integridad física se sus pilotos y demás personasinvolucradas, ya sea aplicada para realizar un cambio de carril o seguir una ruta que se marca medianteuna computadora. Esto se logra mediante la integración de diversos sensores que permiten detectar objetos a su alrededor, obstáculos, distancias entre objetos y vehículos, gracias a la reacción de diferentes actuadores como servomotores, válvulas, etc [5].

Los automóviles contienen cada vez más tecnología que le brinda al usuario mejorar la experiencia de manejo al proporcionar apoyo al auxiliar en diversas situaciones como apoyar al conductor a mantenerse en el carril o pueda realizar otra actividad mientras el vehículo se conduce de manera autosuficiente [5]. Ya que al integrar mejoras tecnológicas como las asistencias de navegaciónautónoma que ayudan al conductor al viajar por largas distancias.

2. Metodología

El diseño se llevó a cabo utilizando modelado mecatrónico para diseñar un prototipo de robot móvil autónomo a escala 1:20. El prototipo cuenta con una autonomía de 60 minutos por cada ciclo de carga-descarga de la batería, así como un sistema de adquisición de fotogramas y una estructura capaz de soportar una carga de 20 kg. Para evitar problemas de manejo y posibles daños al prototipo, se implementó un sistema de frenado basado en sensores ultrasónicos para evitar colisiones con obstáculos u objetos durante la navegación autónoma.

2.1 Modelado

Además, se realizaron diagramas IDEF-0 para definir el proceso que debe llevar a cabo el robotmóvil autónomo, tomando en cuenta las funciones requeridas por el usuario. Estos diagramas permitieron acotar los parámetros y necesidades a cumplir con el prototipo, asegurando un enfoque basado en las necesidades del usuario.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 28, pp. 366 – 376
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

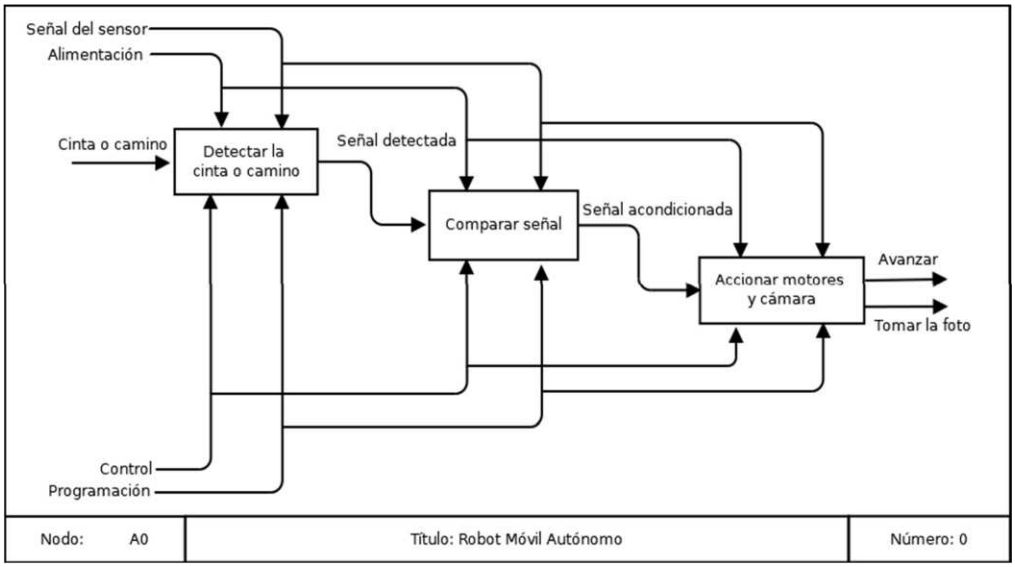


Figura 1. Diagrama A0: Proceso de captación y navegación.

2.2 Diseño Mecánico

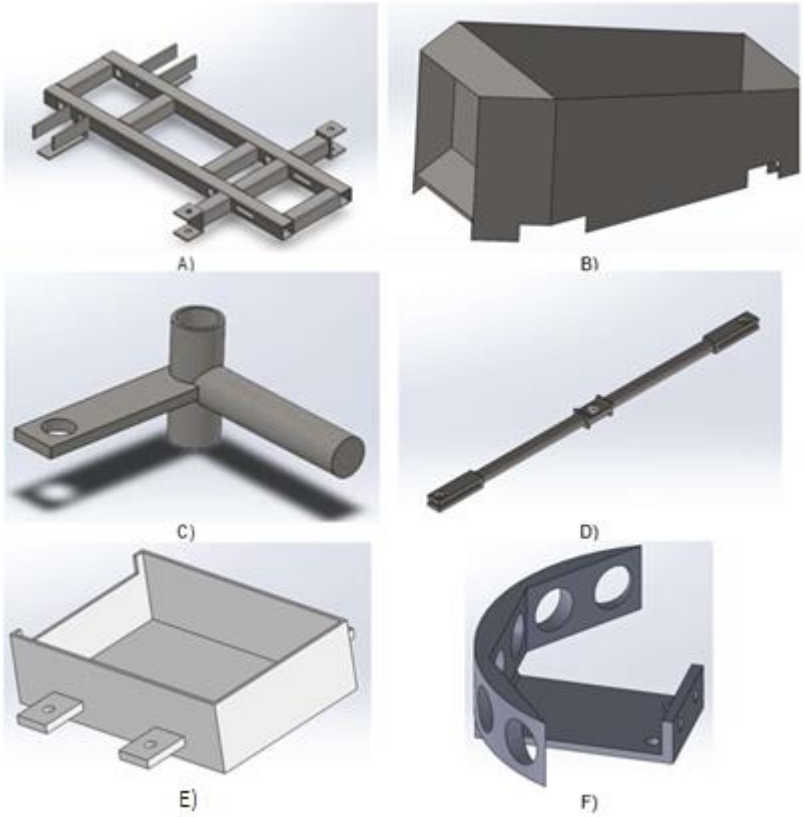


Figura 2. A) Chasis del robot. B) Cuerpo del robot. C) Buje de dirección. D)Barra de dirección. E) Porta baterías. F) Base para ultrasónicos.

En la Figura 2A se muestra el chasis del prototipo, el cual consiste en el uso de un perfil PTR de 1" x 1". Se utilizan 2 PTR como base, unidos mediante 3 PTR estratégicamente ubicados en el medio para optimizar el espacio y permitir el almacenamiento de la batería. Además, se utiliza solera de 2"x3/16" y pequeños pedazos de PTR para las sujeciones del eje delantero y trasero, con el fin de mantener los motores fijos (Figura 2A).

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 28, pp. 366 – 376
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023

Para el cuerpo del robot, se empleará una lámina de acero calibre 25 diseñada con una caja útil para almacenar los componentes electrónicos y de cómputo necesarios para los procesos de captación de fotogramas, cámara, control de los motores y del servomotor para el giro de dirección del robot(Figura 2B).

Los bujes (Figura 2C) se diseñaron para permitir el giro de las llantas dentro de su eje, y la barrade dirección (Figura 2D) controlada por un servomotor ayuda a realizar el movimiento de los bujes paraque el prototipo pueda girar en la dirección deseada.

Se diseñó un estuche para sostener las baterías, el cual se coloca debajo y en medio del chasis, proporcionando el espacio necesario para su ubicación y protección contra posibles colisiones con paredes u objetos. La Figura 2E muestra cómo es el estuche de las baterías.

Otra pieza importante es la base de los sensores ultrasónicos, que se colocarán en la parte delantera del robot para detectar la distancia entre los objetos y evitar colisiones. La pieza diseñada semuestra en la (Figura 2F).

2.3 Diseño de captación de fotogramas

La captación de fotogramas se lleva a cabo mediante la colocación de una cámara webconvencional en la parte frontal del prototipo. La cámara cumple la función de capturar fotogramas de la ruta, que luego se procesan mediante técnicas de binarización, segmentación y normalización de la imagen. Esto permite crear una base de datos para el procesamiento con el fin de detectar objetos u obstáculos durante el recorrido. A partir de esta detección, se realiza un entrenamiento y posteriormentese toman decisiones, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Diagrama de captación de fotogramas.

2.4 Diseño eléctrico

En la parte electrónica, primero se procedió a calcular el torque necesario de los motorreductores, analizando el diagrama de cuerpo libre del robot móvil autónomo (Figura 4).

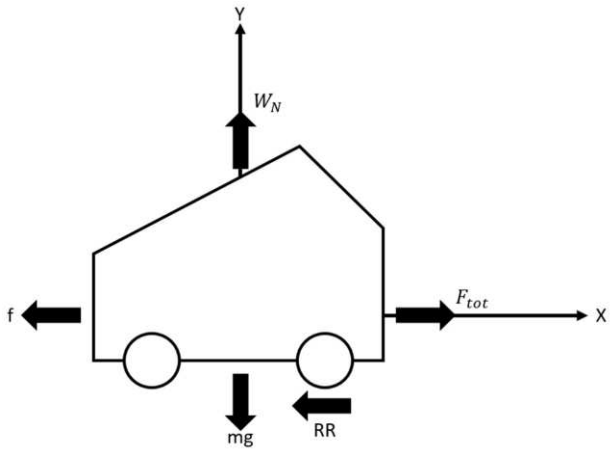


Figura 4. Diagrama de cuerpo libre del robot.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 28, pp. 365 - 273
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

Tomando en cuenta lo siguiente:

- El diámetro de las ruedas es de 0.12 m.
- El material de las ruedas es caucho y se desplazan sobre cemento.
- El peso del prototipo es de 24.62 kg y se estima que con la carga sea de 40 kg.

En la ecuación 1 se analiza la fuerza normal que afecta al robot:

$$W_N = m \cdot g \tag{1}$$

$$W_n = (64.62\ kg) \cdot (9.81 \frac{m}{s^2}) = 633.922\ N$$

Se analiza la fuerza de oposición al movimiento, la cual es 0 debido a que se encuentra en una superficie plana:

$$f = 0$$

En la ecuación 2, se obtiene la fuerza total que se necesita para desplazarse en el material:

$$F_{total} = RRC \cdot W_N + f \tag{2}$$

Donde RRC es el coeficiente de resistencia a la rodadura ($RRC = 0.03$)

$$F_{total} = (0.03)(633.922) + 0 = 19.02\ N$$

Para calcular la potencia necesaria para mover el prototipo junto a la carga se calcula a partir de la ecuación 3:

$$P_{total} = \frac{F_{total} \cdot d}{t} = F_{total} \cdot v_t \tag{3}$$

Donde v_t es la velocidad tangencial de las llantas, es decir, esta velocidad no es un parámetro de diseño y la dificultad que podría tener el control se propone que sea de $0.5\ \frac{m}{s}$.

$$P_{total} = (19.02\ N) \cdot (0.5 \frac{m}{s}) = 9.51\ W$$

La carga será repartida en el eje trasero por lo que la potencia debe ser repartida para cada llanta, el eje trasero contará con 2 llantas:

$$P_{motor} = \frac{P_{total}}{2} \tag{4}$$

$$P_{motor} = \frac{9.51\ W}{2} = 4.754\ W$$

En la ecuación 5 se expresa el par desarrollado para el motor de CD:

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

Sabiendo que $\omega = \frac{v_t}{r}$. Donde r es el radio del neumático y ω la velocidad angular de un motor.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 28, pp. 365 - 273
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

$$\omega = \frac{0.5\,\frac{m}{s}}{0.06\,m} = 4.166\,\frac{rad}{s} = 39.79\,rpm$$

$$T_{\text{motor}} = \frac{4.754\,w}{4.166\,\frac{rad}{s}} = 1.1412\,N \cdot m = 11.637\,kgf \cdot cm$$

La siguiente lista son los componentes con los cuales se desarrollará el proyecto ya que cumplen con características deseadas para el correcto funcionamiento del proyecto:

- Motorreductor Pololu 37D.
- Módulo VNH2SP30.
- Módulo regulador XL4016.
- Cámara Logitech C270.
- Sensor ultrasónico HS-SR04.
- Tarjeta Jetson Nano Developer kit.
- Servomotor MG955.
- Módulo USB Host.
- Arduino Uno.
- Baterías LiPo.

Tabla 1. Energía total consumida.

Componente	Voltaje (v)	Corriente de trabajo (mA)	Cantidad	Potencia (mW)
Motor y driver	12	2700	2	64800
Arduino	5	46	1	230
Cámara	5	250	1	1250
Ultrasónico	5	15	3	225
Servomotor	5	20	1	100
Jetson nano	5	2000	1	10000
Total				76605

El cálculo de la capacidad de las baterías se realizó obteniendo primero el consumo de cada uno de los componentes, como se muestra en la tabla 1. El total del consumo de todos los componentes es de 76.605 W, considerando un voltaje de operación de 12 V.

$$C = \left(\frac{76.605\ \text{W}}{12\ \text{V}}\right) \cdot (1\ hr) = 6.38375\ Ah \quad (6)$$

El resultado anterior se obtuvo considerando que las baterías se descargan al 100%. Sin embargo, para asegurar una mayor duración de las baterías y evitar un desgaste rápido, se recomienda dejar un margen del 20% de capacidad de descarga. Por lo tanto, es necesario calcular nuevamente la capacidad para cumplir con este porcentaje de descarga mínima y así realizar la carga de las baterías.

$$C'' = \frac{6.38375\ \text{Ah}}{0.8} = 7.98\ Ah \quad (7)$$

Mediante el empleo de la ecuación 7, se obtiene que el consumo requerido es de 7.98 Ah. Para garantizar una mayor autonomía y tiempo de reserva, se optó por utilizar una batería con una capacidad de almacenamiento mayor, de 12 Ah a 12 V.

El tiempo de operación se calcula como.

$$Tiempo_{\text{operacion}} = \frac{12\ \text{Ah}}{7.98\ \text{Ah}} \approx 1.5038\ horas \approx 90.2291\ min \quad (8)$$

Una vez obtenidos los componentes electrónicos y los cálculos de las baterías, se procederá a mostrar el diagrama eléctrico. En este diagrama se analizan y realizan las conexiones correspondientes de cada uno de los componentes eléctricos con la batería, módulos, motores y tarjeta de procesamiento (Figura 5). Algunas de las conexiones de la cámara y el Arduino se realizarán directamente a través de comunicación serial con la Jetson Nano.

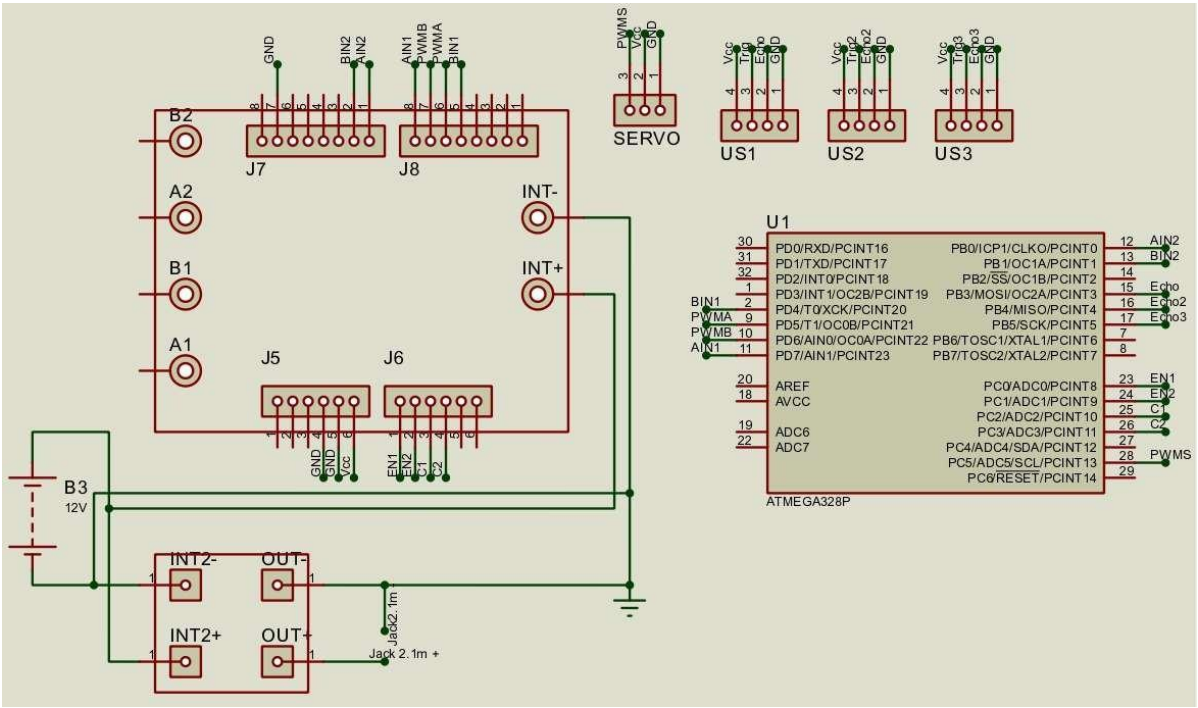


Figura 5. Diagrama eléctrico del robot.

2.5Diseño de PCB.

Con el objetivo de optimizar el cableado, se diseñó un circuito impreso (PCB) donde la mayoría de los componentes se alimentan directamente y las señales se pueden acomodar de maneraestratégica para tener un mejor acceso al controlador. Por lo tanto, se realizaron cálculos para determinar el ancho

de pista necesario para el consumo de corriente, considerando que las pistas paraseñales lógicas tienen un ancho de 25 milésimas de pulgada. Se tomó en cuenta un aumento de temperatura de 10°C y una corriente máxima de 5.5 A. Las ecuaciones 9 y 10 se utilizaron para calcularel ancho necesario de la pista, que resultó ser de 125 milésimas de pulgada. La figura 6 muestra la simulación del diseño de la PCB.

$$A = \left(\frac{I}{k \times T_{Rise}^{b}}\right)^{\frac{1}{c}} \quad (9)$$

$$W = \frac{A}{t \times 1.378} \quad (10)$$

Donde:

- k es 0.048
- b es 0.44
- c es 0.725
- T_{Rise} es 10
- t es 1

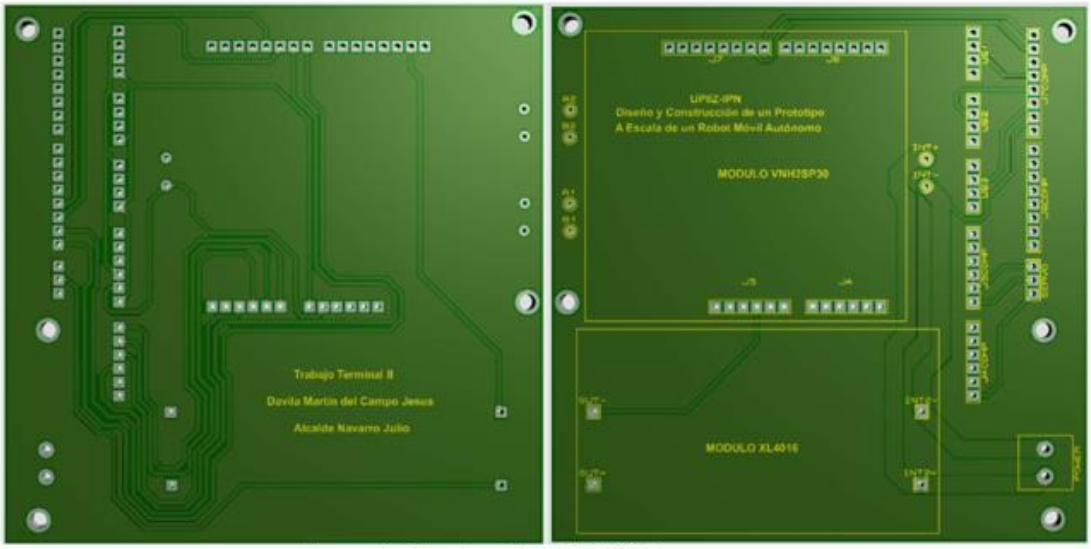


Figura 6. Simulación de la PCB.

2.6 Programación

Se muestra en el siguiente diagrama de bloques de cómo el robot operará utilizando la programación para el dispositivo programable Jetson Nano Developer Kit, utilizando Python (Figura 6). La programación analizará los fotogramas capturados para crear un banco de información con el cual se pueda trabajar con una red neuronal convolucional. Esto permitirá que el robot adquiera capacidadesde razonamiento y toma de decisiones para lograr una navegación autónoma.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico, Capítulo 28, pp. 365 - 273
ISBN: 978-607-9394-27-1, 2023.

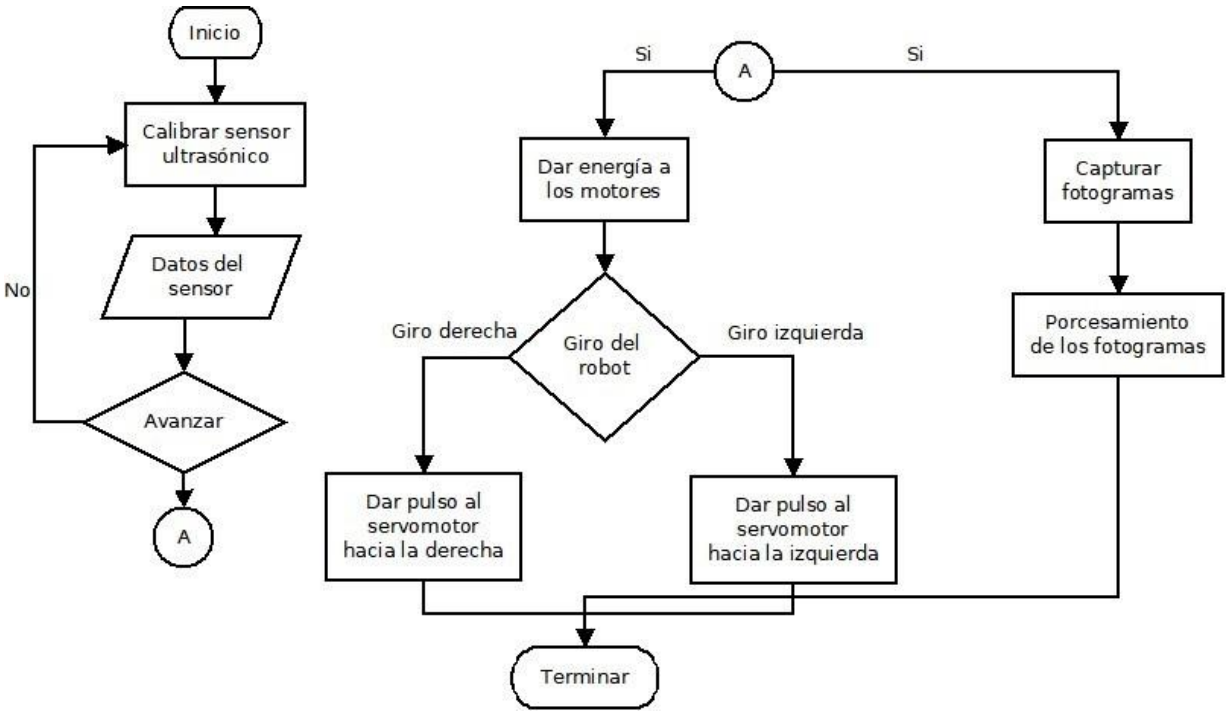
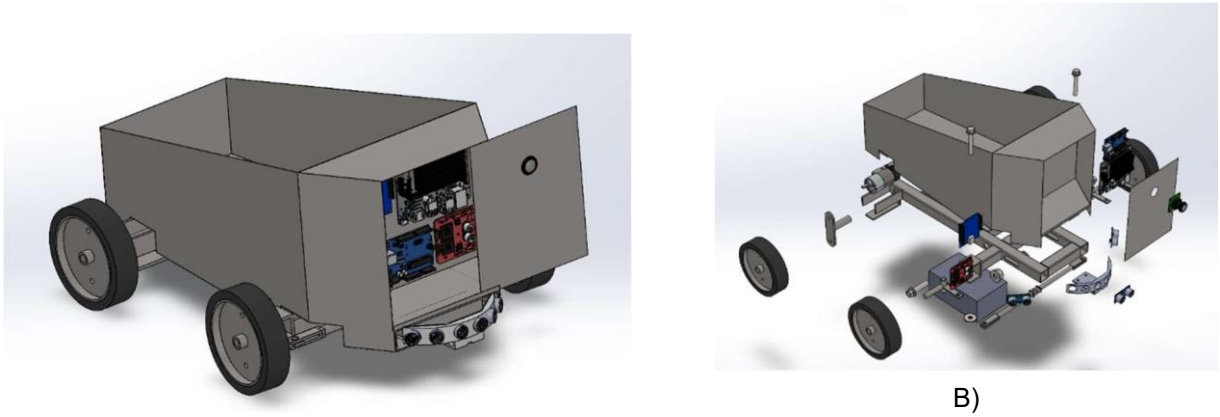


Figura 6. Diagrama de bloques de la programación del robot.

3. Resultados



A) B)

Figura 7. A) Robot ensamblado B) Vista explosionada del robot.

Una vez finalizado el diseño y la selección de los componentes electrónicos necesarios para el prototipodel robot móvil autónomo, se procedió a realizar el ensamblaje en CAD, como se muestra en la Figura7A. La vista explosiva (Figura 7B) del robot se utiliza para mostrar los componentes a trabajar, especialmente aquellos que no se observan claramente en la vista del ensamblaje. Esta imagen buscamostrar la mayoría de los componentes que forman parte del prototipo."

3.1 Simulaciones

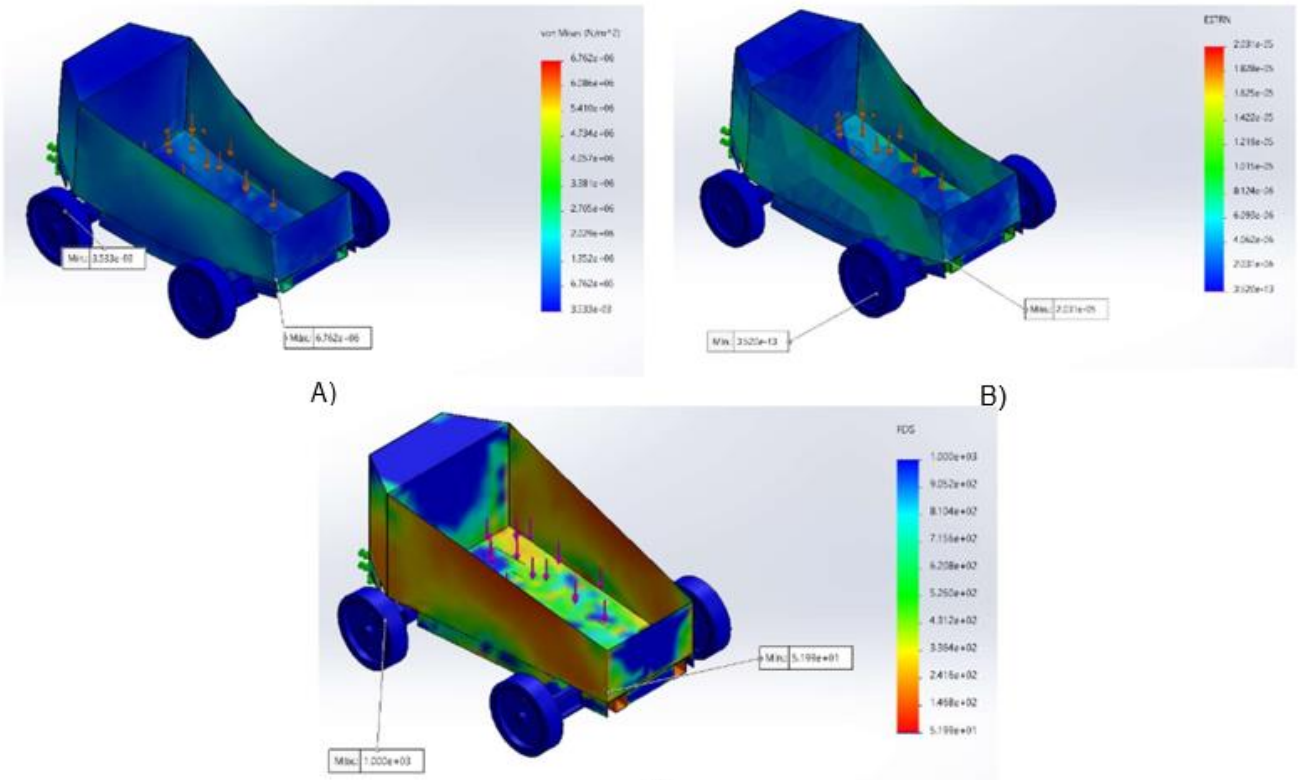


Figura 8. A) Simulación de Von Mises del robot B) Simulación de deformaciones C) simulación del factor de seguridad.

La simulación del robot se realizó en SolidWorks. Se llevó a cabo un estudio estático con una carga de 40 kg para asegurarse de que el prototipo tenga un margen de seguridad adecuado, y se colocó una sujeción fija en el chasis para evitar movimientos del robot. Se realizaron estudios para comprobar si el diseño es capaz de soportar la carga mediante simulaciones, lo cual nos permite asegurar su viabilidad sin necesidad de pruebas físicas. Una de las simulaciones realizadas fue la de tensión de Von-Mises (Figura 8A), en la cual se observa la presión máxima y mínima a las que el prototipo será sometido, y se comprueba la resistencia del material.

La simulación de deformaciones permite analizar cómo se deformará el prototipo con la carga estimada. En la figura 8B se muestra el grado de deformación del prototipo mediante una gráfica de simulación, destacando los puntos de máxima y mínima deformación del robot.

La simulación del factor de seguridad es crucial para corroborar la seguridad del diseño propuesto. En la figura 8C se muestran los valores mínimos y máximos del factor de seguridad del prototipo, considerando el material seleccionado. Se observa que el factor de seguridad es adecuado, ya que la carga a la que estará sometido no afecta negativamente al material.

En cuanto a la parte de programación, se decidió utilizar la Jetson Nano debido a su capacidad para trabajar con inteligencia artificial. En un futuro en el que se busque experimentar con algoritmos demachine learning o inteligencia artificial, la Jetson Nano es capaz de entregar y procesar información entiempo real gracias a su arquitectura. Para el control de sensores y actuadores, se utilizará el Arduino Uno, ya que su microcontrolador permite realizar las tareas sin problemas, recibiendo señales de los sensores y respondiendo a los actuadores principales del

proyecto. Cabe destacar que la Jetson Nano puede enviar información al Arduino mediante comunicación serial, lo que permite experimentar con algoritmos que permitan la navegación autónoma del robot.

4. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos a través de las simulaciones en el diseño mecánico y la selección de componentes electrónicos, se ha concluido la etapa de diseño del prototipo. Se destaca que el diseño propuesto es capaz de soportar una carga de 20 kilogramos, como se ha demostrado enlas simulaciones mecánicas, las cuales han proporcionado información precisa. Se han seleccionado motores con el torque suficiente para el desplazamiento del robot con la carga, respaldados por cálculos correspondientes. Además, se han estimado los requisitos de consumo de energía para que el prototipopueda funcionar durante una hora por cada ciclo de carga-descarga de la batería.

En cuanto a la electrónica, los motores seleccionados son capaces de generar el torque necesario parael desplazamiento del prototipo. Asimismo, se espera que las baterías seleccionadas puedan proporcionar la autonomía propuesta, considerando que los distintos componentes tienen consumos deenergía variables y que los motores experimentarán cambios de velocidad debido a las condiciones decarga. También es necesario que el servomotor tenga la fuerza suficiente para mover las barras de dirección, ya que las llantas deberán soportar el peso del prototipo.

Además, se espera que la ubicación propuesta de la cámara sea adecuada, ya que es una parte fundamental del prototipo al ser responsable de recopilar información visual. Por lo tanto, es importanteque la cámara pueda captar la mayor área de visión posible dentro de su ángulo de percepción.

Referencias

[1] A. Saez-De La Pascua, ‘Deep learning para el reconocimiento facial de emociones básicas’,Universitat Politècnica de Catalunya, 2019.
[2] F. Fandiño, ‘Un robot móvil autónomo y un vehículo guiado tradicional’ ¿Cuál es la diferencia parala industria?’, Metalindustria, no. 24, pp. 74–76, 2019.
[3] L. Rouhiainen, ‘Inteligencia artificial’, Madrid: Alienta Editorial, 2018.
[4] J. García, A. Navalón, A. Jordà, and D. Juárez, ‘Visión artificial aplicada al control de la calidad’,3C Tecnología, vol. 3, no. 5, pp. 297–308, 2014.
[5] Y. Li, M. Díaz, S. Morantes, and Y. Dorati, ‘Vehículos autónomos: Innovación en la logísticaurbana’, Revista de Iniciación Científica, vol. 4, no. 1, pp. 34–39, 2018.

Ingenio del Quehacer Mecatrónico

Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
Prolongación Corregidora Norte No. 168, interior E
Col. El Cerrito, C.P. 76160, Querétaro, Qro.
Distribución en formato digital descargable por internet,
idioma: Español, formato: PDF, pp. 384, Tamaño: 25.2 Mb.

ISBN: 978-607-9394-27-1

ISBN: 978-607-9394-27-1