SINERGIA MECATRÓNICA

VARGAS SOTO JOSÉ EMILIO
TRASLOSHEROS MICHEL ALBERTO
RAMOS ARREGUÍN JUAN MANUEL
OROZCO RAMIREZ JORGE ENRIQUE

Sinergia Mecatrónica

1ª Edición

Vargas Soto José Emilio
Traslosheros Michel Alberto
Ramos Arreguín Juan Manuel
Orozco Ramírez Jorge Enrique

“Sinergia Mecatrónica”
Vargas Soto José Emilio
Traslosheros Michel Alberto
Ramos Arreguín Juan Manuel
Orozco Ramírez Jorge Enrique

© 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, 11 de Mayo del 2019

ISBN: 978-607-9394-17-2

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

Impreso en México – Printed in Mexico

Sinergia Mecatrónica, 2019. Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Índice

Capítulo 1 **1**
Implementación de un Sistema de Medición de Estabilidad Tip-Over en Plataformas Elevadoras Móviles
Juárez Benítez Herly, Rivas Ruiz Jorge, García Hernández Juan Carlos, Martínez Sánchez Noé Alfredo y Souza Jiménez José Antonio.

Capítulo 2 **12**
Implementación de un Equipo de Robots Utilizando Algoritmos Inspirados en Comportamientos Abstraídos de la Naturaleza (OCH)
Ramírez Preciado Leider, Orejuela Echeverri Diana Carolina y De La Cruz Julio

Capítulo 3 **28**
Diseño y Desarrollo de una Luminaria Inteligente con Tecnología IoT
Ramírez Montañez Julio Alberto, Alberto Olivares Mario Alberto, Domínguez Guevara Ricardo, Moncada Malagón Miguel y Alfonso Francia Gendry.

Capítulo 4 **35**
Diseño e Implantación de un Prototipo Medidor de pH y Humedad en el Suelo de un Invernadero
Guillermo Córdova Morales , Elmar Montiel Jiménez, Ramírez Hernández Jonathan, Robles Peña Pascual y Pérez Munguía Hernán.

Capítulo 5 **47**
Dispositivo Mecatrónico Aplicado a la Enseñanza de la Mecánica de Sólidos
Candia García F., Ambrosio Lázaro R.C., Flores Méndez J., Vivaldo de la Cruz I. y Cano Melchor S. de A.

Capítulo 6 **61**
Optimización de Sistemas de GEEMTA
De Gante García Marcos, Candia García Filiberto, Ambrosio Lázaro Roberto C., Escamilla Sánchez Juan Carlos y Arizpe Islas Jorge L.

Capítulo 7 **74**
Algoritmo Denavit-Hartenberg Aplicado en el Control de un Brazo Robot mediante Leap Motion y LabVIEW
Ricaud Gallegos Rogelio Eduardo y Malagón Soldara Salvador Manuel

Sinergia Mecatrónica, 2019. Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Índice

Capítulo 8 **87**
Sensor para la Caracterización de la Radiación Solar Especifica en el Instituto Tecnológico de Puebla
Omar Arturo Castillo Méndez, Jaime Estevez Carreón, Daniel Cadena Rodríguez, Jesús Mendez Cruz y Yolanda Leticia Trujillo Andrade.

Capítulo 9 **94**
Diseño y Construcción de un Levitador Magnético
D. González, S. Vergara, M. A. Vargas, F. Reyes y A. Palomino.

Capítulo 10 **107**
Innovación en el Área de Confección de Prendas de Vestir Mediante Gestión de la Tecnología
Ramírez Escamilla Nydia Esther, Alemán Pérez Berenice Wendoline, Evanivaldo Rivelino Medina Ruiz y Calamaco Dimas Armando.

Capítulo 11 **127**
Diseño de Sistema Robótico Semiautónomo para Monitoreo de Calidad del Agua Superficial
Córdoba Malaver Ana Rocío, Gamboa Contreras Wilson, Castillo Castañeda Eduardo y Benítez Muñoz Sandra Johana.

Capítulo 12 **144**
Metodología de Programación de Trayectorias de un Robot de 2GDL Utilizando la Tarjeta STM32L476RG
Cerón-Morales Israel, Herver-Acuña José Francisco, Castillo-Castillo Sandra Judith y Cortez-Martínez Wendy Aritzel.

Capítulo 13 **159**
Estado del Arte del Softrobot
Gudiño Márquez Jorge Wah-Hing, Gudiño Lau Jorge, Chavez Montejano Fidel, Charre Ibarra Saida y Durán Fonseca Miguel.

Capítulo 14 **172**
Diseño del Control para un Sistema Domótico por medio de la Diadema Emotiv Epoc+
Cordova Alvarez Luis Andres, Guzmán Moya Dayanna Gissel, Gudiño-Lau Jorge, Alcalá Rodríguez Janeth y Charre Ibarra Saida.

Sinergia Mecatrónica, 2019. Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Índice

Capítulo 15 **186**
Dispensador Automatizado de Alimento para Aves
Ávila Velandia Daniel Eduardo, Curtidor Zabala Johan Sebastián
y Torres Núñez Camilo.

Capítulo 16 **198**
Diseño de una Tarjeta de Sensado Basada en un Transductor de Corriente AC
Olvera Balderas José Armando, Sosa Savedra Julio César
y Trejo Estrella Martín Aaron.

Capítulo 17 **212**
Implementación de un Sistema de Control de Transmisión Directa en un Cuadricóptero Utilizando FPGA
Carreón Díaz de León C.L., Vergara Limon S., Palomino Merino D.A.,
Reyes Cortés J. F. y Vargas Treviño M. A. D.

Capítulo 18 **228**
Análisis Experimental Térmico de una Plancha para Laminar Vidrio de Luz Inteligente
Mora Mora Omar, Mora Santos Carlos Alberto,
Mollinedo Ponce de León Helvio Ricardo y Bedolla Hernández Jorge

Capítulo 19 **241**
Generación de Trayectorias para Robot Móvil Mediante una Variación del Método RRT
Salas Medina Raúl Alfredo, García Luna Francesco José
y Luviano Cruz David

Capítulo 20 **254**
Desarrollo de una Estación de Trabajo Automatizada para el Proceso de Llenado de Botellas de Agua de 250 ml
Alejandre-Flores Marisol, Zamacona-Sánchez Daniel,
Ríos-Cruz Edgar Roque y García-Cortés Rocío

Capítulo 21 **267**
Holgura del Conjunto Carcasa-Rotor de una Turbina no Convencional
Rojano Merchant José Ignacio, Bedolla Hernández Marcos
y Bedolla Hernández Jorge

Sinergia Mecatrónica, 2019. Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Índice

Capítulo 22 **279**
Identificación Paramétrica de un Robot Manipulador de 2 Grados de Libertad
Rivera Zurita Abril Lucia, Reyes Cortés Fernando y Félix Beltrán Olga Guadalupe.

Capítulo 23 **291**
Programación y Simulación de un Autómata para un Sistema de Transporte de Moldes de Arena
Zarate Sampedro Oscar, Ordoñez Flores Rafael, Bedolla Hernández Jorge, Díaz Domínguez Judith y García Martínez Luis Manuel.

Capítulo 24 **303**
Análisis del Corte Ortogonal para Diseño de Cuchillas de una Máquina Trituradora de PET Mediante Ansys
Texis Texis Eduardo, Hernandez Corona Francisco, Mollinedo Ponce de León Helvio Ricardo, Bedolla Hernandez Marcos y José Ignacio Rojano Merchant.

Capítulo 25 **314**
Aplicación de Dispositivos Lógicos Programables a Prototipo Pelador de Nopal
Fernando Ibarra Cedano, Víctor Manuel Jiménez Peña, Jesús Arturo Ortega Vázquez, Jesús Alberto Velueta Oliva y Jorge Sosa Sales.

Capítulo 26 **328**
Uso de Tarjeta de Desarrollo Raspberry Pi para Simulación de Sistemas Mecatrónicos No Lineales
Torres del Carmen Felipe de Jesús, Arredondo Martínez Monserrat Sugey, Rueda Martínez Norman Alejandro y Martínez Olmos Juan Manuel.

Capítulo 27 **341**
Diseño, Simulación e Implementación de un Buck Converter Voltage Regulator con un Controlador PI y un Circuito PWM Basado en Arduino
Silva Cruz Eric Mario, Hernández Lucas Luis Octavio, Hernández Castillo Jair Abdiel, Pérez Hernández José Eduardo, Reyes Urenda Josué Vladimir y García García Rafael Adrián

Capítulo 28 **350**
Diseño y Construcción de una Prótesis de mano Controlada por medio de un Sensor Mioeléctrico
Valadez Palacios Andrés, Luviano Cruz David, García Luna Francesco José y García Villalba Luz Angelica.

Sinergia Mecatrónica, 2019. Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Índice

Capítulo 29 **363**
Diseño de Aspas para un Sistema Generador de Energía Eólica
Ramírez Torres Flor, Duarte Morales Alejandra, Cerón Franco Aureliano
y Montijo Valenzuela Eliel Eduardo.

Capítulo 30 **372**
Implementación de Filtro Kalman en Microcontrolador para Sistema VLC
Cortés Aguilar Teth Azrael, Tovar Arriaga Adriana
y González Paz Luis Andrés.

Capítulo 31 **384**
Análisis de Modelos Dinámicos de un Vehículo Aéreo no Tripulado tipo Quadrotor
Allende Peña Jacobo Marcos, Rodríguez Paredes Salvador Antonio,
Salmerón Quiroz Benito Bernardino, Guzmán Martínez Marisela
y Quintero Guzmán Cesar.

Capítulo 32 **404**
Diseño de un Actuador Electromecánico Lineal Guiado
Edgar Daniel García Hernández, Ruíz Torres Maximiano F.
y Sandoval Castro X. Yamile.

Capítulo 33 **411**
Módulo de Comunicación de Red con Conexión Ethernet y WiFi con Enfoque IoT
Zapien Rodríguez José Manuel, Escoto Sotelo Edgardo Abdiel,
Núñez Pérez Francisco Augusto, Ballesteros Pacheco Juan Carlos
y Juárez Machuca Erick Rubisell.

Capítulo 34 **417**
Diseño de Arquitectura IoT para los Boliers en el Proceso de Elaboración de Malta de Heineken Puebla
Sánchez Cuapio Iván Jesús, Conde Camacho Julián,
Tlapale Hernández Salvador, Cervantes Castillo Ma. Guadalupe
y Gutierrez Atecpanecpatl Jonathan.

Capítulo 35 **428**
Diseño y Construcción de un Robot Paralelo de Seis Grados de Libertad 6-UPUR
Cortes Ruiz Hugo Javier, Arias Montiel Manuel y Tapia Herrera Ricardo.

Sinergia Mecatrónica, 2019. Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Índice

Capítulo 36 **445**
Simulación de Desplazamientos Debidos a la Dilatación Térmica en una Estufa Domestica
Cortés Rodríguez Luis Gabriel, Ortega Vivas Cesar Adolfo y Bedolla Hernández Jorge.

Capítulo 37 **457**
Comparación de Imágenes para Reconstrucción con Línea Láser Discriminando Canales para Reducción de Ruido
Díaz Cano Carlos Daniel, Pedraza Ortega Jesús Carlos, Ramos Arreguín Juan Manuel, Aceves Fernández Marco Antonio y Vargas Soto José Emilio.

Capítulo 38 **483**
Implementación de Filtro de Kalman para el Sistema de Control Indirecto de Fuerza en un Servomotor
Ramírez Villa Goretti, Traslosheros Michel Alberto y Torres Rivera Moisés.

Capítulo 39 **495**
Diseño y Simulación de Banco de Pruebas para Sistema PVTOL
Torres Rivera Moisés, Angeles Alpirez Erik Alberto, Ramírez Villa Goretti y Traslosheros Michel Alberto.

Capítulo 40 **505**
Estudio para la Elección del Patrón de Muestreo para la Réplica de una Configuración Isobárica en la Atmósfera
Salas Ramírez Miguel Antonio y Cházaro Zaharias Adriana

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 1, pp.1 – 11, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Implementación de un Sistema de Medición de Estabilidad Tip-Over en Plataformas Elevadoras Móviles

Juárez Benítez Herly[1], Rivas Ruiz Jorge[1], García Hernández Juan Carlos[1], Martínez Sánchez Noé Alfredo[2] y Souza Jiménez José Antonio[1].

[1] Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Hacienda de Rancho Seco S/N, Impulsora Popular Avícola, 57130 Nezahualcóyotl, Méx.
[2] Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad #3000, Ciudad de México, C.P. 04510
Correo de contacto: tono231@hotmail.com

Resumen

Los manipuladores móviles que son controlados por operadores humanos como los utilizados en el campo de la minería, la construcción, forestal, o en las ciudades para realizar tareas de mantenimiento en lugares ubicados a determinadas alturas como las Plataformas Elevadoras Móviles, presentan el riesgo de volcarse cuando realizan una tarea la cual involucra una fuerza en su efector final y/o desplazarse por superficies inclinadas, como es el caso de la industria de la construcción, donde aparecen condiciones que pueden provocar el desequilibrio del manipulador, esto trae como consecuencia accidentes, misiones fallidas, pérdidas materiales y humanas.

Actualmente hay sistemas que evitan la volcadura de los manipuladores móviles, Fig. 1, por ejemplo: sistemas que mediante posturas del manipulador móvil aseguran el equilibrio, llevándolo a una zona segura de trabajo, otros sistemas incorporan elementos mecánicos como estabilizadores que ayudan a mejorar la estabilidad, otros tienen algoritmos complejos de estabilidad, pero tienen el inconveniente de que son difíciles de implementar y además requieren un costo computacional elevado, las plataformas elevadoras operadas por personas solo cuentan con sensores de nivel y de carga, no proporcionan en sí ninguna medida de estabilidad, esto limita la productividad de este tipo de manipuladores.

En este trabajo se implementó un sistema de monitoreo de estabilidad al vuelco "tip-over stability" en un prototipo de una plataforma elevadora móvil articulada, en el que se presentan los resultados de un caso de estudio.

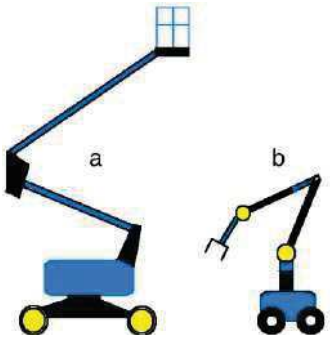


Figura 1. Manipuladores Móviles a) Operado; b) Autónomo

Palabras clave: Vuelco, manipuladores móviles, tip-over, estabilidad, medición.

1 Introducción

En general, uno de los problemas presentados por los manipuladores móviles es la volcadura, esta se presenta cuando estos ejercen grandes fuerzas sobre el medio ambiente, cuando mueven grandes cargas, cuando operan en un terreno desigual o inclinado, etc. El Tip-Over, Fig 2, se lleva a cabo cuando un vehículo nominalmente en posición vertical experimenta una rotación que resulta en una reducción del número de puntos de contacto con el suelo de tal manera que todos los puntos restantes se encuentran en una sola línea (el eje de tip-over). Como consecuencia, se pierde el control, la situación es irreversible y el vehículo se vuelca [1]. Actualmente, se están desarrollando manipuladores móviles capaces de presentar un mejor comportamiento estable cuando se mueve en superficies irregulares o cuando lleva objetos pesados [2, 3].

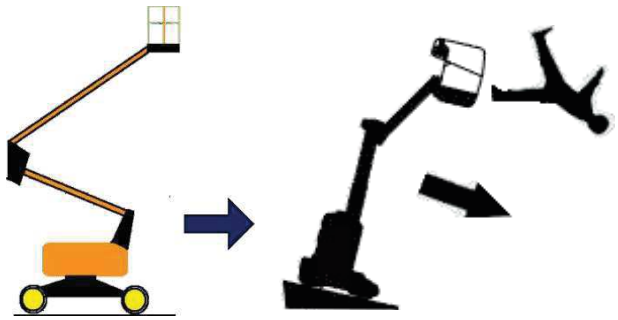


Figura 2. Efecto de Perdida de Estabilidad por Tip-Over.

La medición de este tipo de estabilidad al vuelco representa que tanta oposición presenta el manipulador para hacer frente al vuelco. Es decir, hasta qué punto el vuelco puede suceder, con referencia al valor de la estabilidad correspondiente a la mejor configuración estable que el manipulador puede tener. Para evitar este tipo de volcaduras, se requiere una medida que indique que nivel de estabilidad posee el sistema. Es de interés que los manipuladores móviles operen en condiciones de seguridad y puedan tener una mayor libertad de operación. Para este fin se han presentado algunas propuestas para evitar que un manipulador móvil sufra una volcadura, a continuación, se mencionan las propuestas:

Li y Liu [4], utilizan la redundancia del manipulador montado en una plataforma móvil, para evitar la volcadura generando auto-movimientos en tiempo real. Li y Liu [5], investigan la redundancia de un manipulador móvil con el fin de evitar la volcadura por medio de ajustar los movimientos utilizando redes neuronales. Takubo et al [6], compensan la estabilidad y la manipulabilidad de un manipulador móvil asistente por medio de una impedancia virtual la cual es designada para trabajar como una región de operación que evita el vuelco.

Mu et al [7], estudian los tipos de impactos que se dan cuando la base de un manipulador móvil tiene un impacto que hace que sus soportes se despeguen del piso, encuentran que la situación de vuelco puede ser revertida si hay una correcta configuración del sistema después de saber que ha ocurrido después del impacto con el suelo. Qiu et al [8], estudian la estabilidad dinámica y hacen una planeación en línea de movimientos para la lograr estabilidad de un robot de servicio de configuración omnidireccional, incorporan una programación estándar cuadrática para resolver la planeación en línea.

Wang et al [9], analizan la estabilidad de un humanoide con llantas, mencionan que la estabilidad depende de los puntos de contactos de las llantas y de la postura del humanoide. Haddad et al [10], presentan un esquema estocástico para planear las trayectorias de un manipulador móvil para evitar el vuelco, utilizan el criterio ZMP.

Morales et al [11], Calculan el centro de gravedad de un manipulador móvil y por medio del control de la posición angular de la base del manipulador proyectan el centro de gravedad dentro del polígono de soporte. Nozaki y Murakami [12] estabilizan una plataforma móvil de dos llantas que trabaja cooperativamente con un humano para transportar un objeto, la estabilización se logra por una maximización o minimización de un índice.

Tang et al [13], proponen un control cooperativo para evadir el vuelco de dos robots manipuladores móviles que cooperan llevando un objeto, hacen uso de su redundancia y de la regulación de la fuerza con el objeto. Yang et al [14], estudian la estabilidad dinámica transitoria de un manipulador móvil con cuerpos flexibles, el criterio de estabilidad dinámica transitoria está basado en la fuerza de reacción y en la fuerza de resistencia de derrape que existe en las llantas, muestran que con la vibración de sus componentes elásticos decrece la estabilidad al vuelco.

Bascarevic et al [15] presentan un humanoide con llantas, por medio del criterio ZMP logran evadir el vuelco y mencionan que las mediciones apropiadas de la plataforma ayudan a evitar el vuelco. Choi et al [16], desarrollan un robot móvil de múltiples grados de libertad, semejante a un péndulo invertido, por medio del criterio ZMP estabilizan el robot ante cualquier velocidad de entrada.

Lee et al [17], proponen una compensación en línea para la prevención del vuelco de un manipulador móvil basado en el cálculo recursivo del gradiente del ZMP. Liang, H [18], desarrolla un algoritmo para evitar el vuelco de un manipulador móvil, controla el centro de masa para balancear las fuerzas que actúan en las llantas. Umemoto, K. y T. Murakami [19], proponen un método para controlar la posición de un manipulador móvil sobreactuado, esto se realiza por medio de los comandos apropiados que están basados en la dinámica cero mientras controlan la posición del efector final.

S. Lee, Park, and Park (2014) [20], analizan la estabilidad de un robot móvil que se encuentra en un plano inclinado considerando un circulo de soporte inscrito en el polígono de apoyo y la aceleración del robot móvil. Debido a que en el análisis del vuelco con un polígono de apoyo no solo es importante la posición del robot móvil, sino también la orientación, definen un circulo de soporte inscrito en el polígono de apoyo como una aproximación para medir la estabilidad de un robot móvil en un plano inclinado sin tener en cuenta la orientación del robot móvil.

Talke, Kelley, Longhini, and Catron (2014) [21], desarrollan un comportamiento de prevención automática del vuelco para un manipulador móvil con una carga útil estática. El comportamiento de prevención utiliza la medida de estabilidad Fuerza-Ángulo, para predecir la probabilidad de que el robot se incline desencadenando comportamientos de prevención. Investigaron un enfoque heurístico de la evitación de vuelco, en el que un conjunto de maniobras evasivas que un teleoperador experto podría tomar se activa cuando la estimación de la estabilidad supera un umbral crítico.

Nikhade, Chiddarwar, and Deshpande (2015) [22], presentan el modelo dinámico acoplado de un manipulador y plataforma omnidireccional equipada con ruedas mecanum y su efecto sobre la estabilidad del sistema. Para evitar el vuelco del sistema, las dimensiones de la plataforma móvil se determinan mediante la aproximación del ZMP. Concluyen que el sistema es más estable cuando las coordenadas de ZMP coinciden con el punto más estable y es inestable cuando ZMP se encuentra en o fuera del límite de la región estable.

Guo, Song, Xi, and Mohamed (2017) [23], presentan un método para el análisis de estabilidad al vuelco de un manipulador móvil con ruedas. Para este criterio, se encuentran las fuerzas de reacción del manipulador y los momentos ejercidos sobre la plataforma móvil, después se calcula el momento de vuelco (TOM) alrededor del eje de vuelco. El máximo (TOM) en el sistema ofrece el mayor momento de

vuelco, si el máximo valor es positivo, el sistema se está volcando, si el máximo valor es negativo, el sistema es estable con un momento de vuelco.

En la Feria Mexicana de Ciencias e Ingenierías celebrada en 2014, se presentó el desarrollo un instrumento virtual que permite visualizar la medida de estabilidad en un manipulador móvil [24]. Con este sistema se busca que ahora el manipulador móvil de manera automática se reconfigure para que se encuentre en un mejor estado de equilibrio y por tanto sea menos propenso a volcarse.

En la versión 2015 de la Feria Mexicana se mostraron los resultados de la instrumentación realizada a estabilizadores con distinta geometría, similar a los existentes en plataformas elevadoras comerciales, con el fin de encontrar los puntos adecuados para colocar los sensores y poder tener una media adecuada de la estabilidad [25].

En el 2016 en el mismo evento en cuestión se presentó un avance más en esta línea de investigación desarrollando un prototipo que es capaz de responder de manera automática a los movimientos del brazo manipulador del sistema, restringiéndolo para evitar la volcadura en caso de llegar a una posición de riesgo [26]. Dicho sistema presentó movilidad únicamente en el brazo mientras la base permanecía estática.

En el 2017 se presentaron los resultados de las pruebas realizadas a un manipulador móvil a escala que realizaba distintos movimientos con el brazo con diferente inclinación de la superficie [27].

El criterio de estabilidad tip-over utilizado es simple y eficaz llamado Mean Normal Ground Reactions (MNGR) [28] que es aplicado en un sistema móvil para medir la estabilidad y puede servir como una restricción para controlarlo y llevarlo a la estabilidad.

En el presente trabajo se evalúa la estabilidad en un prototipo a escala 1:2, Fig. 3, de una plataforma elevadora que consta de un chasis rectangular con llantas rin 14, celdas de carga y un brazo hidráulico. En el mecanismo se implementó el sistema medición de estabilidad Tip-Over con el fin de evaluar su comportamiento bajo ciertas condiciones de carga.

Figura 3. Prototipo de Plataforma Elevadora

1.1 Justificación

Se requiere un sistema de supervisión para la detección automática y prevención de inestabilidades por pérdida del equilibrio, en sistemas automáticos u operados por el ser humano, con el propósito de incrementar la seguridad y la productividad de estos manipuladores.

Las plataformas elevadoras móviles actuales cuentan básicamente con dos sistemas de seguridad para evitar la volcadura una vez colocadas en la posición de trabajo, un limitador de ángulo de inclinación y un limitador de carga. En el primer caso utilizan inclinómetros para asegurar que la plataforma no trabajará con ángulos de inclinación superiores a los determinados en sus características técnicas y en el segundo caso, a pesar de que las plataformas elevadoras están sobredimensionadas en cuanto a carga, se instala un limitador para asegurar su correcto funcionamiento. Como limitador de carga se utiliza una celda de carga conectada a un módulo electrónico de pesaje. Estos sistemas restringen en gran medida la productividad de la plataforma ya que prácticamente no proporcionan un rango de operación (se puede operar o no se puede operar).

Una plataforma elevadora puede tener una configuración estable a pesar de encontrarse sobre una superficie inclinada, para llegar a esto es necesario medir el grado de estabilidad en el que se encuentra. Existe el criterio de Estabilidad y los instrumentos necesarios para llevar a cabo el proyecto.

Es muy importante aclarar que el que un operador cuente con un instrumento que le permita saber que tan estable o inestable se encuentra la plataforma, pueden existir dos vertientes al realizar alguna acción para mejorar el nivel de estabilidad: la primera es que toma una decisión correcta y el sistema mejore su estabilidad y la segunda es que ocurra lo contrario, por lo que podría llegar a presentarse una volcadura ya que, se está basando en su percepción que puede ser errónea.

La relevancia de este proyecto se basa en la implementación de un sistema que pueda ayudar a evitar que el manipulador móvil se desestabilice y pueda traer consecuencias fatales.

El sistema de medición de Estabilidad y lo propuesto en este trabajo contribuirá a que en un futuro se tengan sistemas dotados de algoritmos de control que logren estabilidad a la volcadura. Esto de manera automática, lo cual permita trabajar a un manipulador móvil de manera segura cuando trabaja en distintos campos, evitando todos los riesgos que conlleva que un manipulador móvil sufra vuelco.

1.2 Impacto

Existe una diversidad de manipuladores móviles utilizados en distintos sectores como se puede observar en las imágenes, en ninguna de estas plataformas móviles se encuentra un cuantificador de estabilidad tip-over que vaya monitoreando el nivel de equilibrio que tiene la máquina, solo sensores de nivel y de carga que limitan su uso. Si se desarrolla el sistema propuesto de tal forma que pueda ser instalado en todas las plataformas elevadoras móviles manipuladas comerciales se podrá incrementar la productividad de éstas desempeñándose de forma segura que reduzca de manera importante la posibilidad del vuelco.

1.3 Objetivo

Implementar un sistema de medición de estabilidad tip-over en una plataforma elevadora, que le permita al operador monitorear* el nivel de equilibrio que va presentando el mecanismo durante su operación con el fin de evitar el vuelco.

*La medida de estabilidad está en función de las fuerzas normales de apoyo de plataforma elevadora con la superficie, las cuales van variando dependiendo de la configuración del mecanismo.

2. Método Experimental

La Fig. 4 muestra el esquema general de las partes del sistema propuesto para llevar a cabo la medición de la estabilidad para una plataforma móvil de forma remota. Está compuesto por:

a) Construcción de prototipo
b) Instrumentación
c) Adquisición
d) Procesamiento
e) Visualización y Evaluación

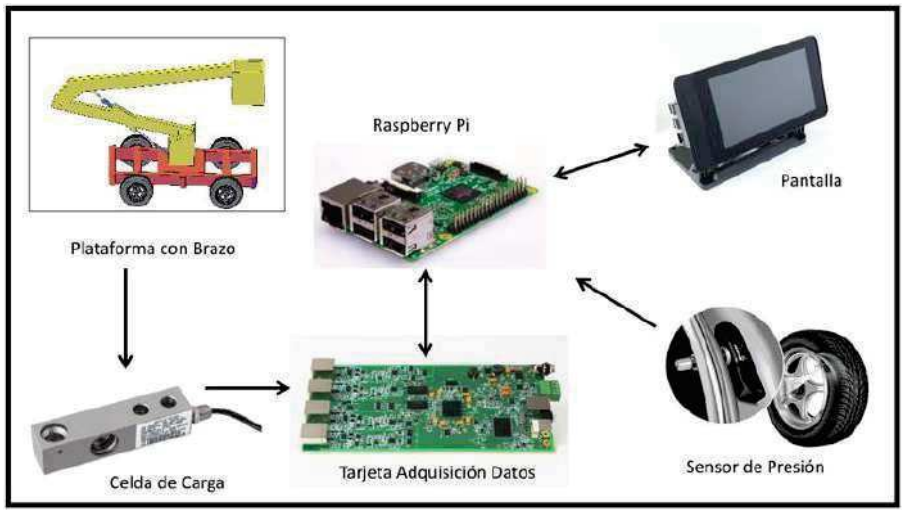


Figura 4. Esquema general del sistema de medición de Estabilidad.

Construcción de prototipo. Se materializó el manipulador del cual se obtuvo el modelado mecánico y su respectiva simulación en un software de CAD. El prototipo está conformado por un bastidor cuya estructura está compuesta por largueros (vigas longitudinales) y travesaños (vigas transversales), llantas, estabilizadores y un brazo mecánico con actuadores lineales, Fig. 5.

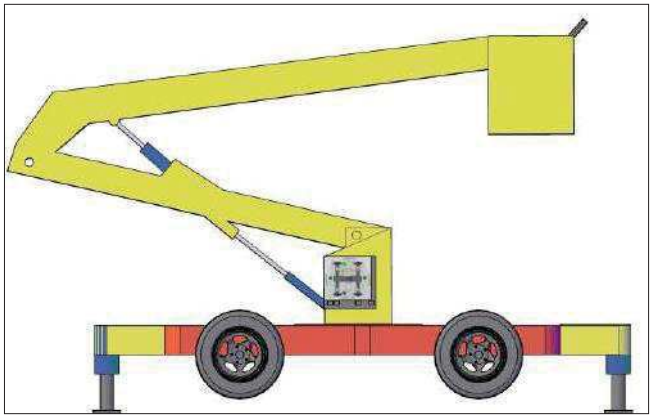


Figura 5. Plataforma Elevadora Prototipo.

Instrumentación. Se colocaron debajo de cada llanta celdas de carga tipo pancake de 500 kg de capacidad de carga, Fig. 6.

Figura 6. Celda de carga tipo pancake

Adquisición de datos. Se llevaron a cabo por medio de una tarjeta de adquisición de datos compuesta por un puente de Wheastone,

Procesamiento. Con los datos adquiridos de manera inalámbrica, se realiza el procesamiento adecuado de las señales para la medición de la estabilidad de la plataforma para su posterior visualización e interpretación.

Visualización. Por medio de un software visual gráfico como instrumento virtual se manipularon las cargas registradas por medio del algoritmo de estabilidad para conocer el grado de equilibrio en el que se encuentra la plataforma móvil. Esta visualización muestra que tan propensa está la plataforma a volcarse.

2.1 Caso de estudio

Se colocó una carga de 40 kg en el extremo del brazo hidráulico, Fig. 7, y se fue cambiando la orientación del brazo como se aprecia en la figura 6, mientras se monitoreaba la estabilidad del prototipo sobre cada borde de apoyo.

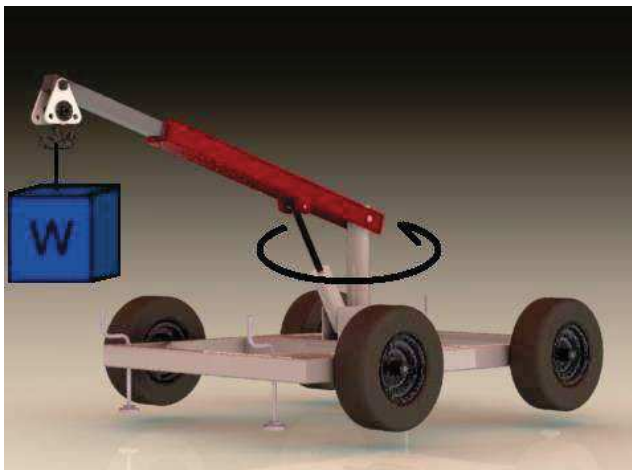


Figura 7. Prueba experimental. Giro del brazo con carga en el efector final

La Fig. 8, muestra la vista superior del manipulador y los 4 bordes de apoyos indicados por B_{ij}.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 1, pp.1 – 11, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

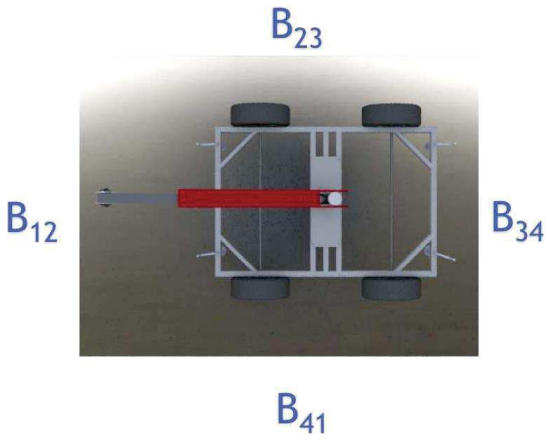
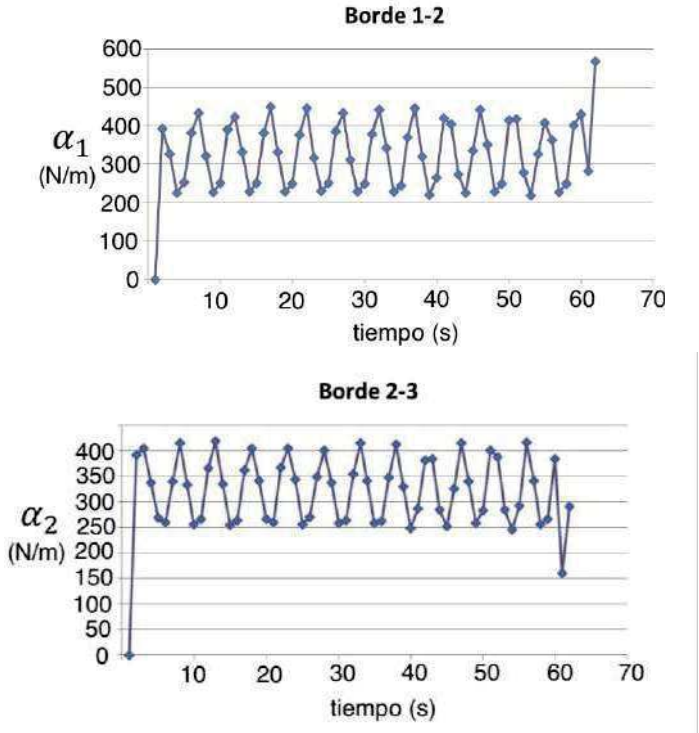


Figura 8. Bordes de apoyo del Manipulador

3. Resultados

El algoritmo de estabilidad está basado en las reacciones normales en los puntos de contacto con las ruedas y en la altura del centro de masa, la unidad de la medida es N/m. La Fig. 8 muestra la variación de la estabilidad tip-over sobre cada borde del polígono de apoyo que, en este caso está formado por cuatro lados a partir del punto de apoyo de las ruedas con la superficie.



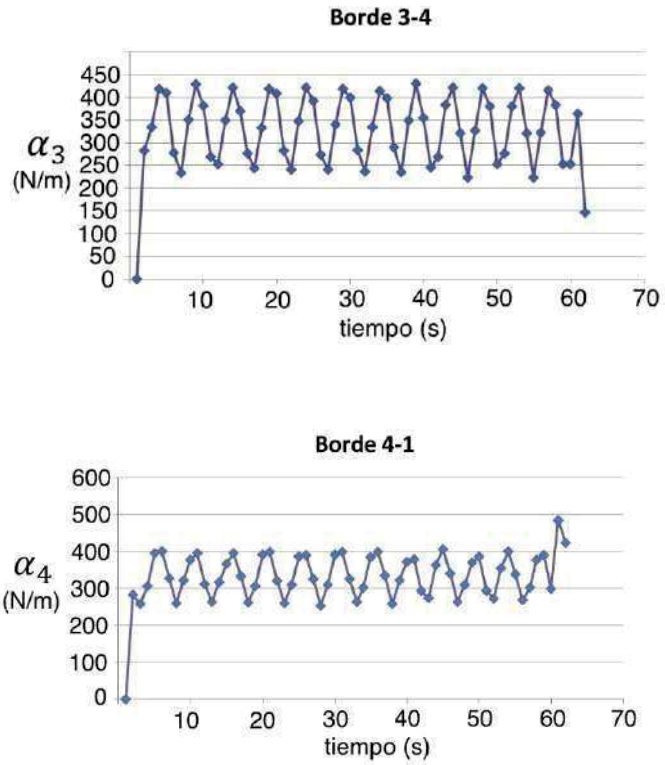


Figura 8. Valores de Estabilidad Tip-Over sobre cada borde de la frontera de apoyo.

Se puede apreciar en las gráficas un comportamiento simétrico de la variación de la estabilidad tip-over.

4. Conclusiones

La prueba experimental previa muestra que con el sistema de medición propuesto, es posible monitorear la estabilidad tip-over en la plataforma elevadora.

El manipulador en ningún momento presentó riesgo de volcadura ya que, como puede apreciarse en la figura 6 , el valor mínimo de estabilidad fue de 150N/m.

En la prueba experimental se observó que la estabilidad puede verse favorecida por la orientación del brazo.

Referencias

[1] E. G. Papadopoulos and D. A. Rey. "*New measure of tipover stability margin for mobile manipulators."* Proceedings of the 1996 13th IEEE International Conference on Robotics and Automation. Part 1 (of 4), April 22, 1996 - April 28, 1996, Minneapolis, MN, USA, 1996, pp. 3111-3116

[2] P. Ben-Tzvi, A. A. Goldenberg, et al. "*Design, simulations and optimization of a tracked mobile robot manipulator with hybrid locomotion and manipulation capabilities."* Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on, 19-23 May 2008, pp. 2307-2312

[3] S. A. A. Moosavian, A. Pourreza, et al. "*Kinematics and dynamics of a hybrid serial-parallel mobile robot."* 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA '09, May 12, 2009 - May 17, 2009, Kobe, Japan, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, pp. 1358-1363

[4] Y. Li and Y. Liu. **"***Fuzzy logic self-motion planning and robust adaptive control for tip-over avoidance of redundant mobile modular manipulators."* Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM 2005, July 24, 2005 - July 28, 2005, Monterey, CA, United states, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, pp. 1281-1286

[5] Y. Li and Y. Liu. *"Online fuzzy logic control for tipover avoidance of autonomous redundant mobile manipulators."* International Journal of Vehicle Autonomous Systems Vol4, No 1, 2006: pp. 24-43.

[6] T. Takubo, H. Arai, et al. *"Control of mobile manipulator using a virtual impedance wall."* Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on, 11-15 May, 2002, pp. 3571-3576

[7] X. Mu, Q. Wu, et al. *"On tip-over situation of mobile platforms via impact effects."* 2005 IEEE International Conference on Control Applications, CCA, August 28, 2005 - August 31, 2005, Toronto, ON, Canada, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, pp. 1546-1551

[8] C. Qiu, Q. Cao, et al. *"Improving the stability level for on-line planning of mobile manipulators."* Robotica Vol 27, No 03, pp. 389, 2008

[9] J.Wang and Y. Li. "*Kinematics and tip-over stability analysis for a mobile humanoid robot moving on a slope."* IEEE International Conference on Automation and Logistics, ICAL 2008, September 1, 2008 - September 3, 2008, Qingdao, China, Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society, pp. 2426-2431

[10] M. Haddad, S. Hanchi, et al. *"Point-to-point trajectory planning of wheeled mobile manipulators with stability constraint. Extension of the random-profile approach."* European Journal of Mechanics - A/Solids Vol. 28, No. 3, 2009, pp. 477-493.

[11] J. Morales, J. L. Martinez, et al. "*Center of gravity estimation and control for a field mobile robot with a heavy manipulator."* Mechatronics, 2009. ICM 2009. IEEE International Conference on Malaga, Spain, 14-17 April

[12] K. Nozaki and T. Murakami. "*A motion control of two-wheels driven mobile manipulator for human-robot cooperative transportation*." Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE, 3-5 November 2009, pp. 1574-1579

[13] C. Tang, C. Xu, et al. "*Cooperative control of two mobile manipulators transporting objects on the slope."* 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2009, August 9, 2009 - August 12, 2009, Changchun, China, IEEE Computer Society, pp. 3198-3203

[14] Y. Yang, X. Zhao, et al. "*Study of Dynamic Transient Stability of a 2-Link Wheeled-Suspended Mobile Flexible Manipulator."* Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 6-7 January, 2011, Third International Conference on Shangshai China, pp. 397-400

[15] N. Bascarevic, K. Jovanovic, et al. "*Tip-over stability examination of a compliant anthropomimetic mobile robot."* 2012 IEEE International Conference on Control Applications, CCA 2012, October 3, 2012 - October 5, 2012, Dubrovnik, Croatia, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, pp. 1584-1589

[16] D. Choi, M. Kim, et al. *"Development of a rapid mobile robot with a multi-degree-of-freedom inverted pendulum using the model-based zero-moment point stabilization method."* Advanced Robotics, 2012, Vol. 26, No. 5-6, pp. 515-535.

[17] S. Lee, M. Leibold, et al. *"Online stability compensation of mobile manipulators using recursive calculation of ZMP gradients".* 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2012, 445 Hoes Lane / P.O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331, United States, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 14-18 May, 2012, pp. 850-855

[18] H. Liang. "*Tip-over avoidance algorithm for modular mobile manipulator.*" Innovative Engineering Systems (ICIES), 2012 First International Conference on Alexandria, Egypt, 7-9 December, 2012, pp. 115-120

[19] K. Umemoto and T. Murakami. *"A position tracking control of two wheel mobile manipulator using COG trajectory based on zero dynamics."* IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 25.28 October, 2012, pp. 2638-2643
[20] S. Lee, J. Park, and J. Park. "*Analysis of mobile robot acceleration for tip-over terrain prediction*." Paper presented at the 2014 11th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 12-15 November, 2014, pp. 467-469

[21] K. Talke, L. Kelley, P. Longhini, and G. Catron "*Tip-over prevention through heuristic reactive behaviors for unmanned ground vehicles."* Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 3 June, 2014

[22] G. R. Nikhade, S. S. Chiddarwar, and V.S. Deshpande. *"Tip-over stability of omni-directional mobile robot."* Paper presented at the 2015 Communication, Control and Intelligent Systems (CCIS), 7-8 November, 2015, Mathura, India, pp. 299-303

[23] S. Guo, T. Song, F. Xi, and R. P. Mohamed. "*Tip-Over Stability Analysis for a Wheeled Mobile Manipulator.* Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control" Vol. 139, No. 5, November 2016

[24] G. Carbajal et. Al. *"Medición de estabilidad Mecánica para plataformas elevadoras móviles que realizan diversas tareas a grandes alturas y que presentan riesgo de volcadura.*" Protocolo de Investigación de Feria Mexicana de Ciencias e Ingenierías, Octubre 2014

[25] C. Alonso et. Al. "*Instrumentación para Medición de Estabilidad de Prototipos de Plataformas Elevadoras Móviles Comerciales que Realizan Diversas Tareas a Grandes Alturas y que Presentan Riesgo de Volcadura.*" Protocolo de Investigación de Feria Mexicana de Ciencias e Ingenierías, Octubre 2015

[26] E. Zavala. *"Control de Estabilidad Mecánica para Plataformas Elevadoras Móviles que Presentan Riesgo de Volcadura."* Protocolo de Investigación de Feria de Ciencias e Ingenierías del Estado de México. Octubre 2016

[27] E. Zavala, et. Al. "*Validación en Tiempo Real de un Control de Estabilidad Mecánica para Manipuladores Móviles que Presentan Riesgo de Volcadura."* Protocolo de Investigación de Feria de Ciencias e Ingenierías del Estado de México, Octubre 2017

[28] J. Souza, V. González, N. Elorza y N. Martínez. "*Prueba experimental de un algoritmo de Estabilidad Tip-Over basado en el criterio de las reacciones normales promedio".* In: SOMI XXIX Congreso de Instrumentación, Puerto Vallarta, Jalisco, México, Octubre 2014, pp. 29-31

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 2, pp.12 - 27, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Implementación de un Equipo de Robots Utilizando Algoritmos Inspirados en Comportamientos Abstraídos de la Naturaleza (OCH)

Ramírez Preciado Leider, Orejuela Echeverri Diana Carolina y De La Cruz Julio

Institución Universitaria Antonio José Camacho – UNIAJC
Facultad de Ingenierías – Tecnología en Mecatrónica Industrial
leyder_1994@hotmail.com
karolina.orejuela@gmail.com
juliofabio.de@utp.edu.com

Resumen

La robótica vanguardista ha basado sus nuevos desarrollos en muchos de los diferentes comportamientos abstraídos de la naturaleza, un claro ejemplo de ello es la robótica colectiva o cooperativa, la cual busca diseñar equipos de robots con la capacidad de resolver problemas operando de manera similar a una colmena, involucrando entornos dinámicos, con condiciones cambiantes para la percepción.

Éste trabajo se desarrolló con la implementación de 4 agentes (1 explorador y 3 recolectores) los cuales lograron explorar una matriz con el fin de llegar a un punto designado como comida teniendo en cuenta la analogía de las hormigas para lo cual se escribió un algoritmo de enjambre.

Palabras clave: Agente, Algoritmo de Enjambre, Colmena, Robótica cooperativa.

1. Introducción

En la mayoría de las ocasiones, un único agente no permite conseguir la robustez y eficacia necesarias. Todo esto debido a que algunos problemas son demasiado difíciles de resolver para un único robot, por citar algunos ejemplos: empujar una caja, explorar un campo, etc. Es por ello que la aplicación aquí desarrollada se fundamenta en mecanismos de comunicación, cooperación y coordinación entre los integrantes del equipo, los cuales poseen las mismas características físicas y electrónicas y navegan de manera autónoma en busca de la solución del objetivo, por lo cual se hace necesario la aplicación de un algoritmo de enjambre, donde dicho algoritmo dota el sistema de inteligencia para la toma de decisiones para el comportamiento colectivo.

El objetivo general de este proyecto propone “Implementar algoritmos bioinspirados para la exploración en campos abiertos que logren la ubicación, recolección, selección y organización de una serie de objetos de una manera colaborativa”.

Según lo anterior para la realización de dicho objetivo se decidió trabajar con la plataforma LEGO Mindstorm®, debido a su practicidad y capacidad de ejecutar variadas órdenes con el fin de hacer más fácil y ligera la manera de desarrollarlas por parte de los robots involucrados en el trabajo.

Éste es un ejemplo práctico de cómo aprovechar un determinado algoritmo, en este caso la optimización en colonia de hormigas o el OCH, como base y emplear propios métodos para lograr

llegar a una solución deseada, en este caso la exploración de un camino, la obtención de un algo (comida) y su recolección.

2. Robótica Cooperativa

El verbo cooperar puede ser definido como “obrar juntamente con otro u otros para un mismo fin”, entonces la robótica cooperativa se basa en un equipo (enjambre) de robots, los cuales son entidades virtuales (simuladas) o mecánicas (físicas) que por distintos medios de comunicación intercambian información para actuar de manera conjunta y conseguir un objetivo.

Una de las problemáticas de la robótica que más interés ha despertado en los últimos años es la cooperación de agentes robóticos que buscan la solución de un problema en común. Los trabajos en esta área han aplicado conceptos de etología animal, la teoría de la organización, el aprendizaje y la inteligencia artificial distribuida, donde ésta última es la cuna de donde salen las propuestas de metodologías para el desarrollo de los distintos proyectos. Según Palacios García [1] “para que los miembros de un sistema multi-robot sean capaces de realizar tareas conjuntas son necesarias la comunicación y la interacción entre ellos, además de considerar la incertidumbre”.

Actualmente la aplicación de los sistemas multi-robots en misiones colaborativas han despertado cada vez más el interés de los investigadores, para ésta fecha son muchos los grupos de investigación que han enfocado sus proyectos en el comportamiento colectivo de los robots móviles, cómo es el caso de L’ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, donde han realizado el proyecto MarXbot [2] ilustrado en la figura 1, dicho proyecto permite experimentos continuos gracias a una gestión de la energía sofisticada y un mecanismo de sustitución de baterías hotswap. Puede auto-ensamblarse con sus compañeros mediante un mecanismo de fijación compatible. Proporciona la visión de alta calidad, tiene una mejor gestión de la energía, la visión y la capacidad de interacción. Al permitir que las tareas complejas en grandes entornos de largos períodos de tiempo, abre nuevas perspectivas para la investigación en robótica colectiva.

Figura 1 Grupo de robots MarXbot.
Fuente: Laboratorio de sistemas- EPFL

2.1 Algoritmos empleados en la robótica cooperativa

Como una categoría de la inteligencia artificial, los algoritmos bioinspirados son técnicas de optimización cuyo diseño se basa en la imitación de procesos biológicos [3]. Las principales características de estos algoritmos radican en no ser determinísticos, presentar estructuras paralelas y ser adaptativos [4]. Gracias a estas características, dichos algoritmos poseen la capacidad de generar soluciones a problemas de búsqueda exhaustiva u optimización de manera eficiente sin la necesidad de tener un conocimiento profundo sobre el problema que se aborde, lo cual permite llegar a resolver problemas multiobjetivo de manera eficaz [5].

- OPTIMIZACIÓN DE COLONIA DE HORMIGAS (OCH): “es una clase de algoritmos de optimización inspirados en las acciones de una colonia de hormigas. Los métodos OCH son útiles en problemas que necesitan encontrar caminos hacia metas. El objetivo la 'simulación de hormigas artificiales' a través de agentes es de localizar soluciones óptimas moviéndose a través de un espacio de parámetros que representa todas las posibles soluciones. Las hormigas naturales establecen las feromonas que dirigen el uno al otro a los recursos y explorar su entorno. La simulación de 'hormigas' igualmente permite grabar sus posiciones y la calidad de sus soluciones, para que en posteriores iteraciones de simulación más hormigas puedan encontrar mejores soluciones”[6]

- ALGORITMO DE COLONIA DE ABEJAS (ABC): “es un algoritmo basado en un enjambre meta-heurístico que fue introducido por Karaboga en 2005. Fue inspirado por el comportamiento de alimentación inteligente de las abejas melíferas. El algoritmo se basa específicamente en el modelo propuesto por Tereshko y Loengarov (2005) para el comportamiento de forrajeo de las colonias de abejas melíferas El modelo consta de tres componentes esenciales: las abejas libando, empleados y desempleados y las fuentes de alimentos…En ABC, una colonia de abejas forrajeras artificiales (agentes) busca fuentes de alimentos artificiales (buenas soluciones para un problema determinado). Para aplicar ABC, el problema de optimización considerado se convierte primero en el problema de encontrar el mejor vector de parámetros que minimiza una función objetivo. Entonces, las abejas artificiales descubren aleatoriamente una población de vectores de solución inicial y luego iterativamente los mejoran mediante el empleo de las estrategias que los llevan a desplazarse hacia mejores soluciones por medio de un mecanismo de búsqueda vecino con el abandono de soluciones pobres” [7]

- REDES NEURONALES ARTIFICIALES (ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS, ANN): Inspiradas en las redes neuronales biológicas del cerebro humano y simulando su estructura mediante métodos matemático-computacionales, el uso de las ANN busca imitar las capacidades propias del cerebro humano, tales como aprender, generalizar y abstraer. Gracias a su capacidad de procesamiento paralelo permite resolver aplicaciones en campos como visión artificial, control, robótica, procesamiento de imágenes, optimización y otras aplicaciones que aún son objeto de estudio [8].

- ALGORITMOS GENÉTICOS (GENETIC ALGORITHMS GA): Basados en la teoría de evolución biológica de Darwin, son métodos de búsqueda para la resolución de problemas. El esquema básico de un algoritmo consiste en una población inicial de individuos (cada uno representa una solución del problema) generada aleatoriamente, operadores genéticos (selección, cruce y mutación) que permiten generar la reproducción y la evolución de los individuos a lo largo de las diferentes generaciones, y por último, una función de evaluación que es la que determina cuándo la población alcanza la solución requerida, sea de búsqueda o de optimización [9].

- ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (PARTICLE SWARM, PS): Estos algoritmos de optimización se basan en el comportamiento colectivo de los organismos vivos (aves, insectos, peces, etc.), aunque la primera aproximación se realizó para imitar computacionalmente el comportamiento social humano [10]. Su funcionamiento consiste en establecer un número homogéneo de agentes simples interactuando entre sí, para generar un patrón de conducta basándose en cinco principios fundamentales del comportamiento colectivo: mantener la localización de cada agente, establecer homogeneidad, evadir colisiones, emparejar la velocidad, mantener el enjambre.

2.2 Algoritmos basados en exploración de campos abiertos

El algoritmo de la colonia de hormigas, es una técnica probabilística para solucionar problemas computacionales que pueden reducirse a buscar los mejores caminos o rutas. Se trata de una metaheurística (algoritmo para guiar la construcción de soluciones o búsqueda) bioinspirada, propuesta por Marco Dorigo en 1992.

Las hormigas en su búsqueda de comida van dejando un rastro de una sustancia llamada feromona (sustancias químicas secretadas por los seres vivos con el fin de provocar comportamientos específicos en otros individuos de la misma especie) que les permite volver al nido. Cada vez que llegan a una bifurcación (disyunción) eligen el camino a seguir de una forma probabilística, tomando con mayor probabilidad el camino que más rastro de feromona tenga. Los caminos más prometedores van acumulando una mayor cantidad de feromonas, pues son recorridos por un mayor número de hormigas. Los caminos menos prometedores son menos transitados y por ende van perdiendo el rastro de feromona por evaporación. Al cabo de un tiempo las hormigas habrán creado un camino mínimo o más corto con rastros de feromonas, así como una evaporación de feromonas que evita la perduración de los rastros, para que no haya estancamiento en óptimos locales.

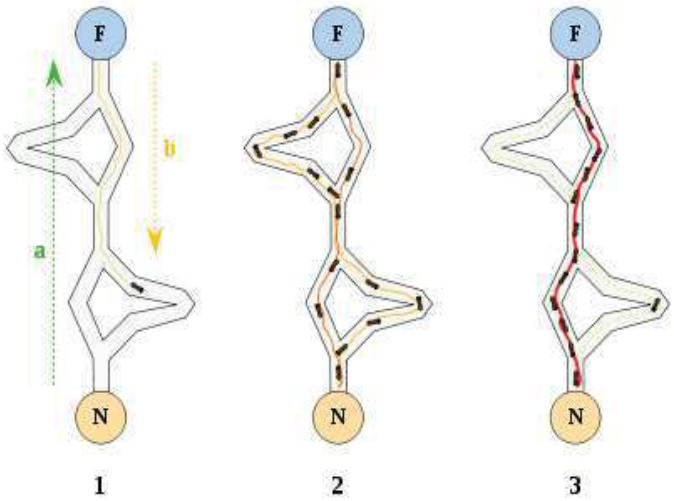


Figura 2 Identificación de ruta y marcación de feromona
Fuente: Wikipedia

La idea original proviene de la observación de la explotación de los recursos alimentarios entre hormigas, en el que las habilidades cognitivas de las hormigas son individualmente limitadas y en conjunto son capaces de buscar el menor camino existente entre la fuente de comida y su nido o colonia.

1. La primera hormiga encuentra la fuente de alimentos (F) a través de cualquier camino (a), entonces retorna a la colonia (N), dejando tras sí un rastro de feromonas;
2. Las hormigas indiscriminadamente siguen cuatro caminos posibles, pero el fortalecimiento de la pista hace más atractivo la ruta más corta;
3. Las hormigas toman la ruta más corta y largas porciones de otras rutas empiezan a perder su rastro de feromonas.

Los algoritmos que se han basado en las colonias de hormigas son:

- SISTEMA DE HORMIGAS (SH): 1991, M. Dorigo, V. Maniezzo y Colorni A. La actualización de feromona se hace cuando todas las hormigas han terminado su proceso. La evaporación y aporte global lo hacen todas las hormigas sobre los arcos de sus soluciones.

- SISTEMA DE COLONIA DE HORMIGAS (SCH): 1997, Dorigo y Gambardella. Utiliza una regla de transición llamada regla proporcional pseudo-aleatoria, que depende de un parámetro

q0. Se incluye una actualización global (evaporación y aporte), cada vez que una hormiga añade un nodo a su solución. La actualización global únicamente la realiza la mejor hormiga.

- SISTEMA DE HORMIGAS MAX-MIN (MMAS): 1996, Hoos Y Stützle Se hace una actualización local de feromona, búsqueda local, y el aporte lo hacen las mejores hormigas. Las feromonas se mueven en un rango Tmáx y Tmín.

- SISTEMA DE HORMIGAS CON ORDENACIÓN (SHO): Bullnheimer et al. Se ordenan las hormigas en función de la bondad de su solución y se actualiza la feromona de los arcos de las mejores hormigas con base a su orden.

- SISTEMA DE LA MEJOR-PEOR HORMIGA (SMPH): Cordón et al. Se aplican conceptos de algoritmos evolutivos (como la mutación) para aumentar la diversidad. Se hace un refuerzo de los rastros de feromonas de los arcos del camino de la mejor hormiga y un refuerzo negativo en los de la peor.

- COLONIA DE HORMIGAS ORTOGONAL CONTINUA (COAC): 1996, Daganzo, C.F. El mecanismo de depósito de feromonas de COAC es permitir a las hormigas la búsqueda de soluciones en conjunto y efectiva. Usando un método de diseño ortogonal, las hormigas en un dominio factible pueden explorar las regiones elegidas de una manera rápida y eficiente, con mayor capacidad de búsqueda global y precisión.

- OPTIMIZACIÓN DE COLONIA DE HORMIGAS CON LÓGICA DIFUSA: 1965, Lotfi A. Zadeh. Este método introduce inteligencia difusa dentro de las hormigas para acelerar las habilidades de búsqueda.

2.3 Algoritmo de optimización de colonia de hormigas

El algoritmo de optimización de colonia de hormigas es de tipo meta heurístico que busca converger a una solución interactuado continuamente por medio de agentes (Hormigas) en donde cada agente encuentra una solución aplicando un criterio probabilismo, pero la convergencia está dada por el conjunto y las interacciones de los múltiples agentes hasta que se cumple un criterio de parada.
El algoritmo de interacción se ejecuta básicamente en tres procesos.

- Inicialización de parámetros.
- Generación de soluciones por medio de agentes.
- Actualización de feromona.

La inicialización de los parámetros consiste en describir el problema a solucionar como un grafo donde los arcos y los nodos, donde los arcos representan el costo en tiempo, distancia, energía etc. En el proceso de encontrar la solución y los nodos representan las instancias del proceso de donde se pueden derivar diversos arcos a otras instancias.
En el caso del presente trabajo se empleó el problema del vendedor viajero que un caso particular empleado en los ejemplos y pruebas del algoritmo ACO que es la búsqueda de la ruta optima de un punto de inicio al punto de meta que en el presente trabajo se ha establecido para un sistema de robots móviles Lego NXT.
La generalización de soluciones aplica un método probabilismo que inicialmente dependerá de los criterios empleados en la asignación del peso de los arcos en el grafo que describe el problema y de la inicialización de la matriz de feromonas que en el caso del problema de la búsqueda de la ruta optima con los robots Lego NXT fue de tipo equiprobable en su inicialización.
Finalmente, el proceso de actualización de feromona que es el proceso iterativo que se ejecuta hasta el llegar al criterio de parada, dependerá de los parámetros establecidos en el reforzamiento y evaporación de feromona.

3. Búsqueda de la ruta optima con ACO

En su tesis de Dorigo planteo el primer algoritmo ACO en el problema del vendedor viajero que se puede relacionar casi de manera directa al comportamiento seguido por las hormigas para la búsqueda del alimento y por lo tanto también representable de manera directa con agentes robóticos que representen las hormigas o el vendedor viajero.

3.1 Problema del vendedor viajero

Este problema describe un vendedor que tiene que recorres un número fijo de destinos siguiendo una ruta con el menor costo posible, donde el costo puede estar representado en tiempo, distancia o dinero. El viajante debe recorrer los destinos visitándolos solo una vez por recorrido.

El problema se representa gráficamente por medio de un grado donde los nodos simbolizan las ciudades y las ramas representa los caminos con un costo asociado, este problema se considera NP - completo.
A manera de ejemplo suponer que el viajante tiene que visitar 100 ciudades y que estas están interconectadas entre si de manera que contemplando todas las posibles combinaciones estas serían 100 que es aproximadamente $9{,}332621544\times10^{157}$ así que si se emplea un algoritmo de fuerza bruta para determinar la ruta más optima el costo computacional no permite la implementación de dicho algoritmo.

Problemas como el del ejemplo son atacados con algoritmos meta eucarísticos como el de optimización por colonia de hormigas para converger a una solución y solventar los costos computacionales altos.
Casos como el del vendedor viajero son empleados en robótico para la planeación de rutas de navegación tanto en robots móviles o drones es por esto que el presente trabajo representa el problema del vendedor viajero por medio de robots Lego NXT que representan los agentes.

3.2 Ecuaciones ACO para el problema del agente viajero (TSP)

Siguiendo la propuesta de Dorigo y Stützle [11] para el problema TSP las ecuaciones empleadas en los robots Lego NXT son:

$$p_{ij}^{k} = \frac{\tau_{ij}^{\alpha}\,\eta_{ij}^{\beta}}{\sum \tau_{ij}^{\alpha}\,\eta_{ij}^{\beta}} \qquad (1)$$

donde la probabilidad probabilidad p para una hormiga k para moverse de i a j estada dada por (1) que depende del valor de atracción η y por la cantidad de feromona τ.
El valor de atracción η está asociada a la distancia entre el nodo i al nodo j por la ecuación (2).

$$\tau_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \qquad (2)$$

Para el proceso de actualización de feromona dado por el factor de atracción η está dado por (3), la actualización de feromona se realiza cuando una hormiga k ha completado el recorrido.

$$\eta_{ij}=(1-\rho)\tau_{ij}+\sum\Delta\tau_{ij}^{k} \qquad (3)$$

En la ecuación (3) se tiene que coeficiente ρ es un valor de evaporación de de feromona y Δτ es la cantidad de feromonas depositadas por las k hormigas.
El depósito de feromonas esta dado por la ecuación (4).

$$\Delta\tau_{ij}^{k}=\begin{cases} Q/L_k & \text{si hay ruta de i a j} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \qquad (4)$$

En la ecuación (4) Q es una constante y L es un valor de costo equivalente a la longitud total recorrida por la hormiga k.

4. Plataformas empleadas

Para la ejecución de las funciones fue necesario crear dos tipos de robots móviles cada uno con capacidades pertinentes dependiendo de la tarea a realizar en el proceso. Éstas fueron definidas como plataforma robótica exploradora y plataforma robótica recolectora.

4.1 Plataforma robótica exploradora

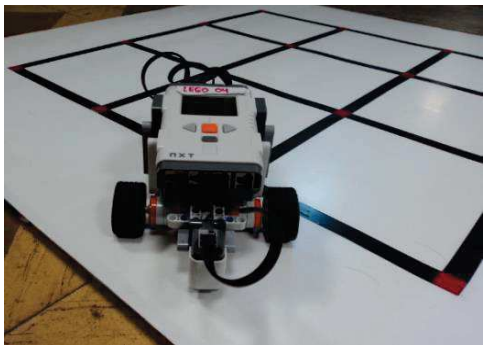


Figura 3 Plataforma robótica exploradora
Fuente: Autores

En la tracción del robot se construyó un sistema de locomoción de triciclo, en el cual el control se hace de manera diferencial, es decir los motores del robot están unidos a las llantas fijas, las cuales dependiendo de la dirección que se requiera dar al robot varían sus velocidades. La tercera rueda es descentralizada y ayuda a dar estabilidad al robot. Para la correcta exploración del robot en la pista se decidió implementar el sensor de color, debido a la facilidad del análisis y reconocimiento de los colores para identificar donde está la pista, cuando llega al nodo y cuando llegó a la meta.

4.2 Plataforma robótica recolectora

Figura 4 Plataforma robótica recolectora
Fuente: Autores

La tracción del robot se construyó teniendo en cuenta un sistema de locomoción de orugas. Las orugas se construyen uniendo, mediante una cadena que rodea las llantas, las ruedas delanteras y traseras, cuyo fin es aumentar la superficie de contacto con el suelo y conseguir una mayor tracción. Las orugas permiten rebasar mayores obstáculos. Utiliza el mismo sensor que el explorador.

4.3 Comunicación

El bloque de NXT puede comunicarse con el computador mediante la interfaz USB que posee, la cual está disponible en la versión 2.0. Además, para comunicarse con otros robots en las cercanías posee una interfaz Bluetooth. Esta conectividad no sólo permite conectarse con otros bloques, sino también con computadores, teléfonos móviles, y otros aparatos con esta interfaz de comunicación. Dentro de las posibilidades de conexión se encuentran:

- Conectar hasta tres dispositivos distintos
- Buscar y conectarse a otros dispositivos que posean Bluetooth
- Recordar dispositivos con los cuales se ha conectado anteriormente para conectarse más rápidamente
- Establecer el bloque NXT como visible o invisible para el resto de los dispositivos.

El firmware del NXT también implementa un sistema de buzones que se puede acceder utilizando este método. Además, la comunicación a través de Bluetooth utiliza un sistema de conexión maestro/esclavo y gracias a esto los programas que se ejecutan en el maestro se puede hacer el envío de paquetes de datos a todos los dispositivos esclavos conectados utilizando el método “BluetoothWrite”. Los dispositivos esclavos escriben los paquetes de respuesta al sistema de buzón de mensajes donde esperan que el dispositivo maestro realice una encuesta para la respuesta.

4.4 Descripción de la pista de pruebas

La pista construida para el desarrollo del trabajo se diseñó como una matriz 4X4, la cual tiene 66 cm de lado, donde se dibujaron los caminos de color negro en un fondo blanco, los nodos de la pista fueron señalados de color rojo para que el robot identificara que ya había llegado a éste y a su vez el punto de comida fue señalado de color amarillo.

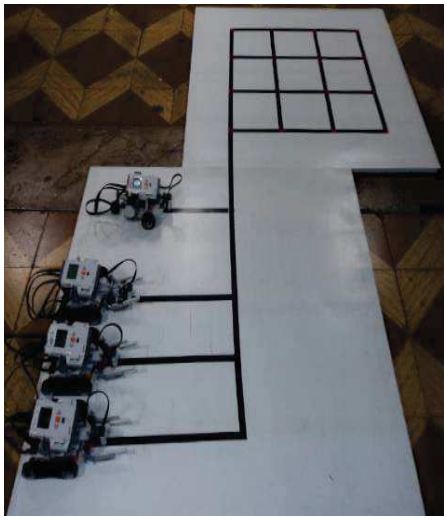


Figura 5 Arena
Fuente: Autores

5. Implementación del algoritmo de control

5.1 Algoritmo implementado en los robots Lego NXT con Bricxcc

El algoritmo utilizado en el presente trabajo es bioinspirado en la Optimización de Colonia de Hormigas. Se siguieron algunas pautas o conceptos básicos tales como la hormiga exploradora y las hormigas recolectoras, la consecución del alimento y el rastro de las feromonas. Sin embargo, no se siguieron las fórmulas exactas para su fin, por el contrario, se emplearon métodos alternativos ideados y experimentados por el grupo de trabajo.
En los experimentos se establecieron los siguientes parámetros para las ecuaciones ACO implementadas:

- α, β iguales a 1.
- k igual a 1 ya que los robots no exploran de manera simultánea.
- La longitud de las rutas iguales i a j iguales.
- Valor Q igual a 1

Este control se realizó desarrollando una función con la cual se busca que el robot haga el seguimiento y reconocimiento de su entorno. Una vez el robot explorador llega al lugar donde reposa la comida hará el envío de la información para que los esclavos vayan hasta ahí para recolectarla.

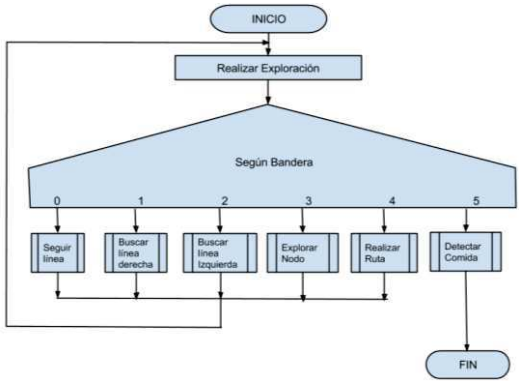


Figura 6 Algoritmo de control
Fuente: Autores

Para la realización de la ruta se hace una matriz teniendo en cuenta los cuatro puntos cardinales basándose en el funcionamiento real de una brújula, partiendo siempre en posición norte desde el punto 0 ubicado en el extremo inferior izquierdo de la pista. En su recorrido se asignó a cada fila un valor, de los cuales la fila inferior tomó el valor 0 hasta llegar a la fila superior que tiene el valor 3.

En condiciones iniciales con el frente del robot en dirección norte y siguiendo la ruta trazada y teniendo en cuenta las múltiples decisiones del robot se han creado las variables i y j, haciendo referencia a las columnas y filas respectivamente, las cuales a medida que el robot haga la selección de camino aumentan hacia el oriente y norte y disminuyen en caso contrario.

La programación del algoritmo se realizó en el entorno de programación Bricx Command Center [12] que utiliza una sintaxis basada en el lenguaje C con un conjunto de instrucciones orientadas a los robots Lego desde las versiones RCX, NXT y la más reciente EV3. La elección del se debió a tres características que son:

- Compatibilidad con el firmware que trae por defecto el ladrillo Lego NXT, que en el caso del entorno basado en Java Lejos requiere descargar un firmware que lo hace incompatible con el entorno de bloques que trae por defecto el Lego Mindstorm.
- Capacidad de programación de arreglos matriciales necesarios para el algoritmo basado en ACO.
- Manejo de buzones para la comunicación y intercambio de información entre los robots por medio de la interfaz Bluethooth.

Es importante indicar que a pesar de que los ladrillos lego NXT tienen un entorno de programación intuitivo basado en bloques, la forma estructurada y basada en funciones del Bricx es más indicado para la programación de algoritmos de cierta complejidad y extensión entendiendo que el entorno de programación por bloque no tiene implementado de manera directa declarar variables en forma de arreglos además del uso de funciones trigonométricas.

5.2 Algoritmo implementado en Processing

Dado que el algoritmo ACO requiere muchas iteraciones para converger en una solución optima se opto por la implantación en Processing [13] de un simulador que emplea una agente virtual que hace los recorridos sobre una pista con las características empleadas en la pista real, además este tipo de algoritmo requiere de manera empírica cambiar los parámetros de depósito y evaporación de feromona que afectan la velocidad de convergencia.

También el cambio de los valores iniciales de la matriz de feromona, variación de las distancias entre nodos son más fáciles de recrear en un entorno virtual.

También gracias a la gran cantidad de bibliotecas o librerías de Processing se pudo realizar un aplicativo de realidad aumentada basada en OpenCv [14] y en comunicación con el robot lego NXT desarrollada por Jorge Cardoso [15], en la figura 7 se observa en el entorno recreado.

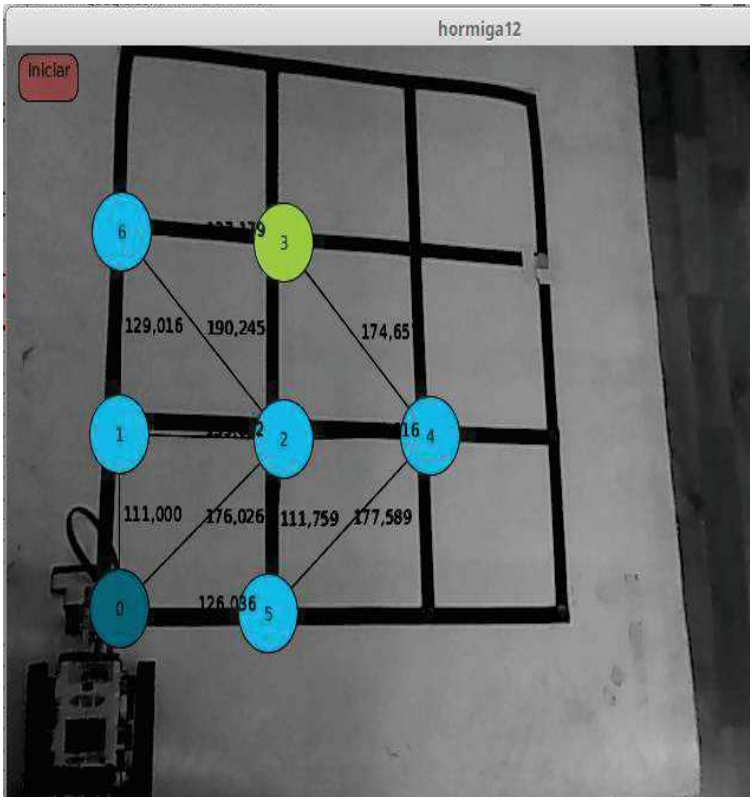


Figura 7. Entorno virtual
Fuente: Autores

6. Pruebas y resultados

Se realizaron tres tipos de pruebas, las primeras con el robot Lego explorador y los tres robots recolectores (ver figura 8) se consignan en la tabla 1. Se observa que, aunque el robot explorador siempre llego a la meta, los tiempos fueron muy variados, así como las rutas seguidas pero el depósito de feromona fue lo suficiente para que los robots recolectores hicieran un recorrido menor al del robot explorador.

Hay que tener en cuenta que los tiempos también varían de acuerdo con el estado de las baterías del robot.

Tabla 1. Recorrido del robot explorador.

Prueba	Tiempo (s)
1	135
2	210
3	245
4	90
5	190
6	333
7	350

De esta prueba se observa que, aunque la modificación realizada en el algoritmo ACO sirve para encontrar una solución esta no es la más optima y que requiere más repeticiones de exploración del robot explorador pero los tiempos que requiere un robot Lego son altos para una implementación práctica, es por esto por lo que se complementó este experimento con el entorno virtual en Processing.

La segunda prueba consistió en una implementación del Algoritmo ACO para el problema del agente viajero con la ecuación (1) descrita anteriormente.

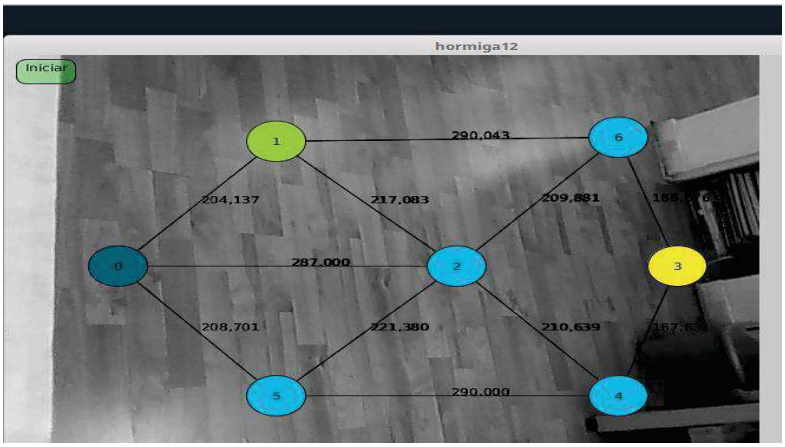


Figura 9. Entorno virtual
Fuente: Autores

La tercera prueba consistió en una implementación del Algoritmo ACO simulando 7 nodos de la arena de pruebas variando la posición de la meta en los nodos 1,2,3,4,5 y 6 en la figura 10 se observa el entorno de realidad aumentada con la meta en el nodo 6.

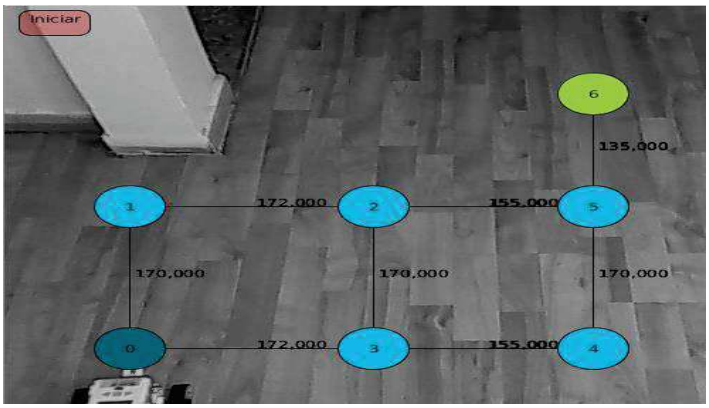


Figura 10. Entorno virtual de 7 nodos
Fuente: Autores

En las siguientes tablas se consignan los resultados de las 6 pruebas realizadas en cada nodo.

Tabla 2. Pruebas de con la meta en el nodo 1.

Prueba	Nodo Meta	Recorrido al que converge	Iteraciones hasta que converge
1	1	0 - 1	458
2	1	0 - 1	486
3	1	0 - 1	533
4	1	0 - 1	607
5	1	0 - 1	673
6	1	0 - 1	575
7	1	0 - 1	465
8	1	0 - 1	563
9	1	0 - 1	562
10	1	0 - 1	372
Promedio			529.4

Tabla 3. Pruebas de con la meta en el nodo 2.

Prueba	Nodo Meta	Recorrido al que converge	Iteraciones hasta que converge
1	2	0 – 1- 2	847
2	2	0 – 1 - 2	715
3	2	0 – 1 - 2	1114
4	2	0 – 1 - 2	623
5	2	0 – 1- 2	885
6	2	0 – 1 - 2	842
7	2	0 – 1- 2	963
8	2	0 – 1- 2	1303
9	2	0 – 1 - 2	809
10	2	0 – 1 - 2	895
Promedio			899.6

Tabla 4. Pruebas de con la meta en el nodo 3.

Prueba	Nodo Meta	Recorrido al que converge	Iteraciones hasta que converge
1	3	0 - 3	551
2	3	0 - 3	421
3	3	0 - 3	447
4	3	0 - 3	637
5	3	0 - 3	582
6	3	0 - 3	431
7	3	0 - 3	327
8	3	0 - 3	486
9	1	0 - 1	479
10	1	0 - 1	522
Promedio			488.3

Tabla 5. Pruebas de con la meta en el nodo 4.

Prueba	Nodo Meta	Recorrido al que converge	Iteraciones hasta que converge
1	4	0 – 3 - 4	1108
2	4	0 – 3 - 4	1089
3	4	0 – 3 - 4	959
4	4	0 – 3 - 4	1147
5	4	0 – 3 -4	1113
6	4	0 – 3 - 4	1156
7	4	0 – 3 - 4	1158
8	4	0 – 3 - 4	1183
9	4	0 – 3 - 4	1276
10	4	0 – 3 - 4	1119
Promedio			1130.8

Tabla 6. Pruebas de con la meta en el nodo 5.

Prueba	Nodo Meta	Recorrido al que converge	Iteraciones hasta que converge
1	5	0 – 1 - 2 - 5	5381
2	5	0 – 1- 2- 5	2755
3	5	0 – 3 – 4 - 5	2163
4	5	0 – 3 – 4 - 5	8377
5	5	0 – 3 – 4 - 5	2981
6	5	0 – 1 -2 -3 -5	2324
7	5	0 – 3 – 4 - 5	5492
8	5	0 – 1 - 2 - 5	3695
9	5	0 – 3 – 4 - 5	2807
10	5	0 – 3 – 4 - 5	3650
Promedio			3962.5

Tabla 7. Pruebas de con la meta en el nodo 6.

Prueba	Nodo Meta	Recorrido al que converge	Iteraciones hasta que converge
1	6	0 – 1 - 2 – 5 - 6	9415
2	6	0 – 3 – 4 – 5 - 6	10176
3	6	0 – 1 - 2 – 5 - 6	18336
4	6	0 – 3 – 4 – 5 - 6	9325
5	6	0 – 3 – 4 – 5 - 6	13008
6	6	0 – 3 – 4 – 5 - 6	8418
7	6	0 – 3 – 4 – 5 - 6	9421
8	6	0 – 3 – 4 – 5 - 6	5771
9	6	0 – 1 - 2 – 5 - 6	7163
10	6	0 – 3 – 4 – 5 - 6	9393
Promedio			10042.6

De estas pruebas se observa que:

- Para la exploración para el nodo 1 que la ruta a la se converge es la misma y en promedio tarda 529 interacciones para converger a la ruta 0 a 1 de los nodos. En la simulación el rastro de feromona inicial y valor de depósito es bajo.

- Que para el nodo 2 los posibles recorridos son 0 – 1 – 2 y 0 – 3 – 2 y que sin importar que ruta se tome la distancia recorrida es la misma sin embargo la ruta elegida fue la 0 – 1 – 2 y además hay un incremento del número de iteraciones para converger acorde con el incremento de la distancia a recorres por el nodo adicional.

- Igual que en el recorrido de 0 – 1 el recorrido 0 – 3 la distancia es aproximadamente la misma y tardo en promedio 488 iteraciones para converger un valor empleado en el recorrido 0 – 1.

- En el nodo 4 se es evidente de manera gráfica identificar que la ruta mínima está dada por el recorrido 0 – 3 – 4 y este fue acorde al resultado de convergencia con 1130 iteraciones de promedio.

- Para el nodo 5 se encontraron dos soluciones generadas por el sistema, que son la ruta 0 – 1 – 2 – 5 y la ruta 0 – 3 – 4 – 5 ya que las dos rutas tienen la misma distancia, sin embargo, la ruta 0 – 3 – 4 – 5 fue más frecuente en la prueba

- Finalmente, para el nodo 6 se esperaba que el tiempo de convergencia fuera similar al del seguido con el nodo 5, sin embargo, este fue de 10043 iteraciones en promedio más de dos veces del empleado en el nodo 5. También aunque la ruta 0 – 1 – 2 – 5 – 6 y la ruta 0 - 1 – 2 – 3 – 4 - 5 – 6 tienen la misma distancia la ruta 0 – 1 – 2 – 5 – 6 fue más frecuente.

Conclusiones

Después de realizar y evaluar el presente trabajo, se puede concluir lo siguiente:

- Según [16] en la comunicación vía Bluetooth cuando uno de los ladrillos NXT es configurado como maestro sólo se pueden conectar a él hasta tres dispositivos esclavos, usando la conexión 1,2 y 3 del NXT, dado que la posición 0 estará reservada para el maestro. Es por esto por lo que el trabajo se realizó con 4 robots

- La elección de los objetos de búsqueda se hizo bajo el régimen de la altura del sensor detector a una altura máxima de 1.5cm. Y Durante la realización del trabajo se pudo evidenciar la gran aplicabilidad del sensor de color toda vez que no fue necesaria la adición de otro sensor para la consecución de los objetivos.

- El algoritmo fue programado en lenguaje de instrucciones ya que por su complejidad y versatilidad permite una programación más robusta.

- El agente recuerda los nodos que ha recorrido, utilizando para ello una lista de nodos visitados. Al finalizar, esta lista contiene la solución construida por el agente.

- Que para una realización funcional del algoritmo basado en algoritmo ACO es necesario muchas iteraciones y robots en la pista o arena tal como ocurre en el símil biológico que son las hormigas.

- Tal como se empleó el sistema de simulación realizado en Processing, los datos recolectados en sistemas basados en geoposicionamiento y mapas permitirían la implementación del algoritmo ACO para encontrar rutas óptimas para automóviles o drones que se empleen en sistemas de reparto de productos.

- La robótica cooperativa es una rama amplia de continua investigación que permite dar solución a múltiples problemas cotidianos, éste trabajo pretende despertar la curiosidad en este campo en los diferentes grupos de investigación en la región.

REFERENCIAS

[1] Palacios García, A.C. (2009). "*Aprendizaje Cooperativo de Conceptos para Sistema Multi-robot*". Tesis de Maestría. México. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

[2] Bonani, M., Longchamp, V., Magnenat, S., Rétornaz, P., Burnier, D., Roulet, G., Vaussard, F., Bleuler, H., Mondada, F. (2010) The MarXbot, a Miniature Mobile Robot Opening new Perspectives for the Collective-robotic Research.

[3] T. Bäck, et al., "*A survey of evolution strategies*", Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms. Dortmund: Morgan Kaufmann, vol. 1,1991.

[4]C. Alonso, et al., "*Model selection in genetic programming*", in Proceedings of the 12th annual conference on genetic and evolutionary computation. ACM. New York, Estados Unidos, 2011.

[5] A. Konak, et al., "*Multi-objetive optimization using genetic algorithms: a tutorial*", Realiability Engineering and System Safety Journal, 2006.

[6] Dorigo, M., Stützle T., (2004) "*Ant Colony Optimization*". MIT. ISBN 0-262-04219-3

[7] Scholarpedia, "*Artificial bee colony algorithm"*. Disponible en: <http://www.scholarpedia.org/article/Artificial_bee_colony_algorithm >

[8] X. Basogain, "*Redes neuronales artificiales y sus aplicaciones*". Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela Superior de Ingeniería Bilbao. Open Course Ware. Disponible en: <http://ocw.ehu.es/ensenanzas-tecnicas/redes-neuronales-artificiales-y-sus- aplicaciones /Course_listing>

[9] D. Whitley, "*A genetic algorithm tutorial*", Statistics and Computing Journal, 1994.

[10] R. Ebehart, Y. Shi, "*Particle swarm optmization: developements, applications and resources*", in Conference on Evolutionary Computation. IEEE. Seúl, 2001.

[11] Dorigo, M. Stützle, T. (2004), *" Ant Colony Optimization "*, A Bradford Book The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England.

[12] Bricxcc, "Bricx Command Center 3.3*"*. Disponible en: < http://bricxcc.sourceforge.net/>

[13] Processing IDE, "Processing*"*. Disponible en: < https://processing.org/>

[14] OpenCv for Processing, "Computer vision for Processing". Disponible en: <https://github.com/atduskgreg/opencv-processing>

[15] NXT robots for Processing, "The NXTComm Processing library allows you to control the Lego Mindstorms NXT robots.". Disponible en: <http://jorgecardoso.eu/processing/NXTComm/>

[16] Doxygen, NXC, versión 1.2.1 r4 2011

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 3, pp.28 - 34, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Diseño y Desarrollo de una Luminaria Inteligente con Tecnología IoT

Ramírez Montañez Julio Alberto, Alberto Olivares Mario Alberto, Domínguez Guevara Ricardo, Moncada Malagón Miguel y Alfonso Francia Gendry

Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), campus Aeropuerto, carretera a Chichimequillas S/N, Ejido Bolaños, 76140, Santiago de Querétaro, Querétaro, México

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de una lámpara inteligente a partir de tecnología IoT (Internet of Things). Este tipo de lámparas son una solución al ahorro de energía, iluminando solo cuando es necesario, mediante comandos enviados a través de un dispositivo móvil o a través el monitoreo de las condiciones de su entorno.

Palabras clave: IoT, Lámpara, Ahorro de energía, Aplicación Móvil.

1. Introducción

El consumo eléctrico del hogar es una preocupación de cualquier persona. El costo asociado a la iluminación es uno de los factores con mayor impacto en este contexto y la forma más común de ahorrar en iluminación es mediante el remplazo de las luminarias por aquellas de menor consumo.

Se realizó un estudio práctico sobre el costo/consumo de energía (ver Tabla 1) sobre 3 tipos de luminarias: incandescentes (1), ahorradoras (2), y led (3), tomando en cuenta un cálculo para 10 focos con un uso de 8 horas y con las tarifas establecidas en la Comisión Federal de Electricidad [1] al 2018.

Tabla 1. Comparación de Luminarias.

	1	2		3	
	Philips	**Marca Mavrik**	**Marca ETCO**	**Philco**	**GE (Dimeable)**
Precio de compra de 10 focos	$350	$400	$480	$1,000	$1,500
Precio individual	$35	$40	$48	$100	$150
Consumo individual (W)	100	25	24	15	15
Iluminación individual (W)	100	100	95	100	100
Consumo de energía bimestral (kW)	$600	$150	$144	$90	$90
Primeros 75 kW	$59.48	$59.48	$29.48	$59.48	$59.48
Siguientes 65 kW	$62.14	$62.14	$62.14	$62.14	$62.14
Resto	$1,288.	$28.0	$11.2	$ -	$ -
Precio Total Bimestral	$1,410	$149.8	$132.8	$121.6	$121.6
Precio por día	$23.51	$2.49	$2.21	$2.03	$2.03

Analizando los resultados podemos observar lo siguiente:

- Aproximadamente al mes y medio el foco incandescente supera el precio del consumo de cualquiera de los otros tipos.
- A los 6 años y medio el precio del consumo del foco ahorrador de 25 W ha superado a los demás.
- Para 10 años el foco LED es el de menor precio en consumo seguido por el ahorrador de 24 W y el LED dimeable.

El ahorro de energía incluso puede ser mayor recurriendo a sistemas inteligentes de iluminación. Trabajos recientes [2,3,4] han demostrado el increíble ahorro en energía y, consecuentemente, en emisiones de CO_2 mediante el ajuste de la luminosidad de las lámparas a la luz ambiental y encendiéndose solo cuando es necesario, es decir, solo en la presencia de peatones. Sin embargo, cabe mencionar que estas aplicaciones están enfocadas al alumbrado público. En este trabajo se desarrolla una lámpara de iluminación inteligente para uso doméstico con el uso de tecnología IoT. Sus características buscan el ahorro de energía del usuario y un mayor confort.

2. Desarrollo

Para el desarrollo de la lámpara se ha dividido el trabajo en 4 elementos: Microcontrolador, Electrónica, Aplicación Móvil y Estructura. A la vez se ha utilizado tecnología *IoT (Internet of Things),* es decir, el medio de comunicación entre el usuario y la lámpara es una conexión a Internet. El usuario contará con una aplicación móvil y la lámpara un microcontrolador con dispositivo *WiFi*, y así ambos podrán intercambiar información, en este caso, los comandos y horarios de encendido/apagado de la lámpara, así como la luminosidad de la misma (ver Figura 1).

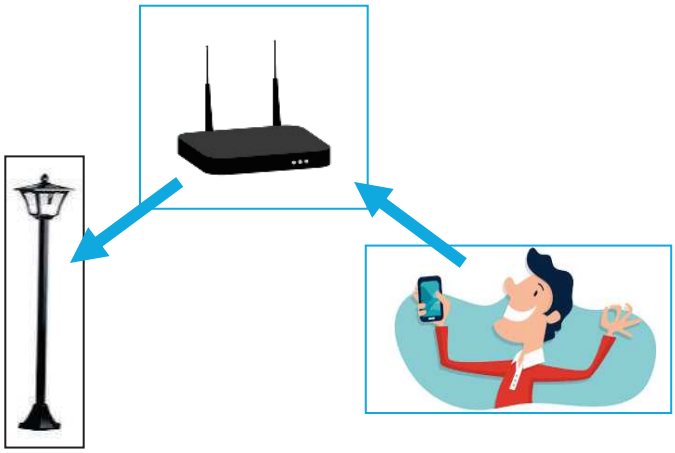


Fig. 1. Comunicación con la Lámpara.

2.1 Electrónica

La arquitectura de la electrónica para la lámpara está descrita en la Figura 2.

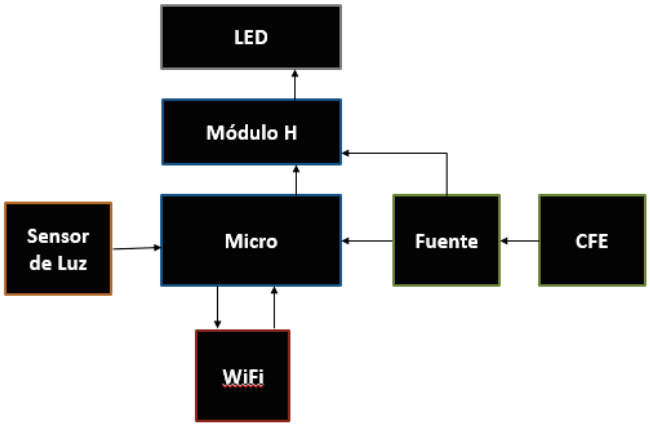


Fig. 2. Arquitectura de la electrónica

Se requiere una fuente para la reducción y conversión del voltaje suministrado por la CFE, la cual es de 120 V AC a 21 V DC para el LED. Y una fuente secundaria de 5 V DC para alimentar el microcontrolador. La fuente de 21 V alimentará a un circuito BOOST, el cual aumenta el voltaje a un máximo de 30V con una corriente de 2 A. Esto permite utilizar la máxima luminosidad del LED. La fuente secundaria de 5V se utiliza para alimentar al microcontrolador. Además, una etapa de protección y regulación entre la fuente y el LED se ha añadido (módulo H).

Por otro lado, se ha utilizado una fotorresistencia como sensor de la luz ambiental, para permitir el modo de encendido y apagado automático de la lámpara. Y por último el WiFi representa la conectividad a internet permitiendo el control a distancia.

2.2 Microcontrolador

El microcontrolador seleccionado es un módulo ESP8266. Las características que nos ofrece este dispositivo son las siguientes:

- Tamaño: 58x26 mm.
- Programado con lenguaje C/C++.
- 1 Pin de Entrada Analógica y varios otros de Entradas/Salidas Digitales.
- Rango de conexión de ~80 m (sin obstáculos).

Este microcontrolador es programado fácilmente mediante el uso del IDE de Arduino. El algoritmo con el cual se ha programado es el siguiente:

```
Algoritmo
if (comando_nuevo = true):
        if (comando1):
          Guardar horario ON/OFF
          Guardar Intensidad
        if(comando2):
          Actualizar Status (ON/OFF)
        if(comando3):
          intensidad_actual = intensidad del dimmer
Obtener fecha_hora_actual
Obtener luz_actual
if (fecha_hora_actual = fecha_ON or [AutON=true and luz_actual < umbral])
        if(Intensidad_guardada = Automática)
           intensidad_actual = calcular intensidad
        else
           intensidad_actual = usar intensidad guardada
        Status =ON
if (fecha_hora_actual = fecha_OFF or [AutOFF=true and luz_actual > umbral])
      Status = OFF
```

Para la gestión de la comunicación entre la lámpara y la aplicación móvil se han establecido un protocolo de comunicación, el cual consiste en tres tipos de mensajes (ver Figura 3).

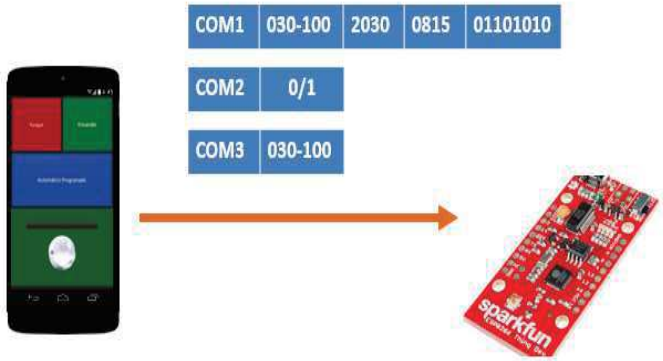


Fig. 3. Protocolo de Comunicación

La aplicación enviará tres tipos de mensajes caracterizados por el inicio de la palabra COM1, COM2, y COM3. El COM1 hace referencia al comando de programado de encendido y apagado, éste contiene 3 dígitos entre 030 y 100 que indican la luminosidad de la lámpara, posteriormente cuatro dígitos que indican la hora de encendido (formato 24 horas) y los siguientes 4 dígitos son la hora de apagado, al final del mensaje se observan 7 dígitos binarios los cuales representan los días de la semana en que está activada la configuración. El COM2 es un comando de encendido y apagado que solo contiene un dígito 0 o 1. Y el COM3 contiene tres dígitos que representan la luminosidad de la lámpara que requiere el usuario.

2.3 Aplicación Móvil

La aplicación móvil se ha desarrollado por medio del uso de *MIT App Inventor 2.* La interfaz de la aplicación es la siguiente (Ver Figura 4).

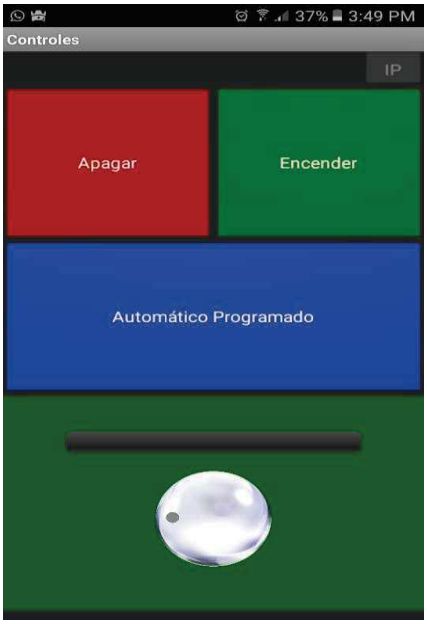


Fig. 4. Interfaz Inicial.

En esta pantalla se puede acceder a las funciones básicas de encendido y apagado, así como las opciones para la programación automática y ajuste de luminosidad. A continuación, se muestra la pantalla de programado de encendido/apagado (Ver Figura 5).

Fig. 5. Pantalla de Programación de Horarios.

Aquí se puede establecer los horarios de inicio y fin del encendido de la lámpara, los días en los que se desea que se encienda, así como la intensidad de esta.

2.4 Diseño de estructura

Se procuró una lámpara con un diseño colonial para jardín, con una altura de 85 cm, la cual tiene una base para alojar la electrónica (Ver Figura 6).

Fig. 6. Lámpara.

3. Resultados

3.1 Características Inteligentes

Finalmente, la lámpara cuenta con tres características las cuales buscan el ahorro en consumo eléctrico del usuario, estas son:

1. Encendido y Apagado Programado: Esta característica permite al usuario establecer una hora de encendido y apagado de la lámpara, especificando la hora de encendido y apagado y los días.
2. Encendido y Apagado Automático: Se ha añadido la opción de encendido y apagado en modo automático lo que supone que la lámpara encenderá y se apagará dependiendo de la cantidad de luz solar.
3. Ajuste de la Luminosidad de la Lámpara: La lámpara tiene la capacidad de que se le ajuste la luminosidad.

Se obtuvo un primer prototipo de lámpara inteligente realizado por alumnos de la maestría en Inteligencia Artificial de la UAQ, combinando un objeto de uso muy común, pero proporcionándole características inteligentes las cuales le brindan un valor agregado al usuario en cuestiones de ahorro de energía y comodidad. Si bien existen productos en el mercado de luminarias inteligentes, el prototipo presentado en este trabajo nos da la pauta para poder integrar tecnologías de IoT en luminarias y nos alienta a crear productos conforme a las características que requieran los clientes.

Por otro lado, cabe mencionar que la característica de Encendido/Apago Automático presenta aun defectos debido a que el sensor de luz ambiental (fotoresistencia) no es preciso. Para ello se ha pensado utilizar las mediciones de otras lámparas, ya que por medio del IoT las lámparas podrían compartir esta información entre ellas, tal que la toma de decisión de Encendido/Apagado Automático sea más precisa sin recurrir a sensores más sofisticados y más caros.

4. Conclusiones

Mediante el uso de tecnología de IoT se ha desarrollado una lámpara con diferentes características que incluyen el encendido/apagado de forma remota, mediante horarios y de forma automática, dependiendo de la cantidad de luz ambiental. En trabajos futuros, para evitar la lectura errónea del sensor de luz ambiental se utilizarán las mediciones de más lámparas, es decir, el controlador utilizará las mediciones de varias lámparas para determinar de forma acertada la cantidad de luz ambiental. También se desea ampliar las capacidades de ésta, habilitando la comunicación con la lámpara desde cualquier red WiFi, dando un valor agregado superior al producto final.

Referencias

[1] Tarifas - CFE. (n.d.). Retrieved December 9, 2018, from https://app.cfe.mx/aplicaciones/ccfe/tarifas/tarifas/Tarifas_casa.asp?Tarifa=DACTAR1&anio=2018
[2] Popa, M., & Marcu, A. (2012). A Solution for Street Lighting in Smart Cities, 5, 91–96.
[3] Leccese, F. (2012). Intelligent wireless street lighting system.
[4] Zhang, J., Qiao, G., Song, G., Sun, H., & Ge, J. (2013). Group decision making based autonomous control system for street lighting, 46, 108–116. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.05.025

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 4, pp.35 - 46, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Diseño e Implantación de un Prototipo Medidor de pH y Humedad en el Suelo de un Invernadero

Guillermo Córdova Morales[1], Elmar Montiel Jiménez[2],
Ramírez Hernández Jonathan, Robles Peña Pascual y Pérez Munguía Hernán [3]

Instituto Tecnológico Superior de Libres
Camino Real Esq. Calle Cuauhtémoc, Barrio de Tétela, Libres Puebla. C.P. 73780
gcormora@hotmail.com

Resumen

El presente artículo describe los resultados obtenidos de la metodología para diseñar y crear un prototipo medidor de pH y humedad en el suelo para un invernadero de hortalizas. El prototipo desarrollado genera una medición de pH y humedad del suelo de un invernadero, con base a un análisis previo con el objetivo de que se consideren, los valores del porcentaje de Nitrógeno antes de aplicar un fertilizante, sabiendo los valores del pH, el productor podrá decidir el tipo de fertilizante a utilizar para la aplicación en el cultivo. Esto generara un ahorro económico en cuanto a la compra de fertilizantes solo comprara los necesarios para la producción, también aumentara la calidad de los productos, teniendo un suelo rico en nutrientes balanceados para la planta, los productos serán de mucho mejor calidad, generando una buena ganancia para el productor y un buen producto para el consumidor.

Palabras clave: pH, humedad del suelo, sonda, LCD, instrumentación electrónica.

1. Introducción

En los suelos, el pH es usado como un indicador de la acidez o alcalinidad de éstos y es medido en unidades de pH. El pH es una de las propiedades más importantes del suelo que afectan la disponibilidad de los nutrimentos, controla muchas de las actividades químicas y biológicas que ocurren en el suelo y tiene una influencia indirecta en el desarrollo de las plantas. Así también la humedad del suelo se refiere a la cantidad de agua por volumen de tierra que hay en un terreno. Esta es de gran importancia debido a que el agua constituye un factor determinante en la formación, conservación, fertilidad y productividad del mismo, así como para la germinación, crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas.

El presente artículo tiene como finalidad demostrar la metodología de construcción del prototipo medidor de pH y humedad en el suelo de para un invernadero de hortalizas, ya que estos parámetros son de suma importancia para la producción de cultivos de hortalizas, porque muestran valores relacionados con las reacciones químicas que provocan los fertilizantes y acerca de los nutrientes que se proporcionan al suelo, así como la cantidad de agua que se posee y a partir de estos datos realizar acciones que favorezcan al crecimiento optimo de los cultivos para su buena calidad de producción.

[1] Profesor de la carrera de Electromecánica del ITeSL.
[2] Profesor de la carrera de Electromecánica del ITeSL.
[3] Alumnos de la carrera de Electromecánica del ITeSL

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 4, pp.35 - 46, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

2. Metodología del prototipo

Se crea un sistema metodológico el cual se sigue hasta generar sistemas independientes para cada parte del prototipo, dando énfasis a las piezas que se cree serán las más importantes para poder lograr los resultados requeridos. En la figura N° 1 se muestra la sistemática que se sigue para conseguir un prototipo virtual, antes de generar costos por un modelo real.

Figura 1. Metodología.

En el diagrama anterior se puede observar de manera muy general todo lo que se llevara a cabo desde el inicio. En primer lugar se tiene que analizar las necesidades y sus parámetros para después poder realizar un diseño conceptual del prototipo y una vez teniendo este diseño poder manipularlo a través de un software en 3D y tener un panorama más amplio y preciso.

Seguido se tiene que simular los ensambles y las uniones de las piezas para evitar conflictos de medidas erróneas para después simular los sistemas mecánicos y electrónicos del mismo y así obtener una visión de cómo quedara en físico utilizando diferentes software de simulación y armado así como de software de programación para establecer un control esquemático sobre la obtención y la presentación de datos.

Una vez concluido ese término se procederá a realizar los presupuestos y la adquisición de materiales para la construcción del prototipo de acuerdo al diseño propuesto. Una vez que el prototipo este armado en su totalidad se realizara pruebas y mejoras para que al final el prototipo quede armado, probado y justificado que como tal es un producto funcional y listo para trabajar.

2.1. Concepto del Medidor de pH y humedad

El medidor de PH es un equipo esencial en la mayoría de los laboratorios, asimismo para muchos procesos analíticos y sintéticos. Sin embargo, para su desarrollo se ha requerido mucho esfuerzo por parte de individuos y organizaciones, a los cuales para honrarles, hablaremos sobre su participación en la evolución de este tipo de medidor crucial para muchas operaciones actuales.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 4, pp.35 - 46, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Figura 2. Medidor de pH actual

2.2. Propuesta del sistema de pH y humedad

El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución, la escala de pH varía de 0 a 14. El pH indica la concentración de iones hidrógeno [H] más presentes en determinadas disoluciones. Se puede cuantificar de forma precisa mediante un sensor que mide la diferencia de potencial entre dos electrodos: un electrodo de referencia (de plata/cloruro de plata) y un electrodo de vidrio que es sensible al ion de hidrógeno.

Además, hay que utilizar un circuito electrónico para acondicionar la señal adecuadamente y que podamos usar este sensor con un micro-controlador, por ejemplo: con Arduino.

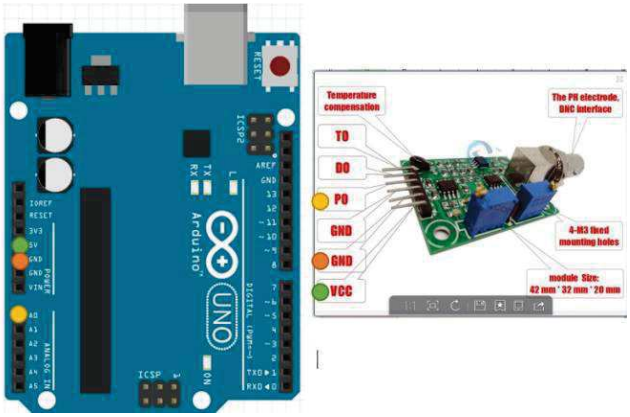


Figura 3. Interfaz entre arduino y sonda pH

Se establecen parámetros iníciales con los cuales el diseño varía según las necesidades del sistema requerido, los valores de la tabla 1 muestran los valores de pH que el suelo puede adoptar según los minerales del mismo:

Tabla 1. Parámetros establecidos de pH

Se denomina humedad al agua que impregna un cuerpo o al vapor presente en la atmósfera el cual, por condensación, forma las nubes, que ya no están formadas por vapor sino por agua o hielo. El agua está presente en todos los cuerpos vivos, ya sean animales o vegetales; esa presencia es fundamental para la vida. En efecto, el agua es tan necesaria para los seres vivos que, los seres humanos, por ejemplo, pueden subsistir más tiempo sin comer que sin beber.

El contenido de humedad en los suelos es la cantidad de agua que el suelo contiene en el momento de ser extraído. Una forma de calcular el contenido de humedad es pesar la muestra cuando se acaba de extraer, m_1, y pesarla de nuevo después de haberla mantenido durante 24 horas en un horno a una temperatura de 110 °C, m_2.[1]

Para calcular el porcentaje de humedad en el suelo ocupamos la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de humedad} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \,.$$

m_1 = Masa de la muestra recién extraída.

m_2= Masa de la muestra después de calentada en el horno. (1)

2.3 Estructura y partes del prototipo

El prototipo tiene o consta de diferentes partes y apartados, tanto electrónicos como físicos. Dentro de las partes electrónicas se encuentran la sonda de pH junto con su interfaz de lectura analogía que consta de una tarjeta y un micro controlador amplificador que se encarga de regular y mejorar los pulsos obtenidos por la sonda.

Figura 4. Sonda de pH y tarjeta de interfaz utilizada

Otros de los materiales electrónicos utilizados fue un sensor de humedad de suelo mediante conductividad eléctrica. Este sensor actúa emitiendo una pequeña señal de corriente entre sus dos terminales y si conduce la electricidad es señal de que hay presencia de humedad, en cambio si no conduce nada de electricidad significa que no hay presencia de humedad.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 4, pp.35 - 46, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

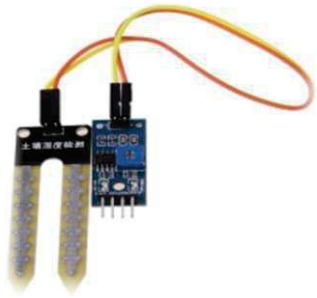


Figura 5. Sensor de humedad por conductividad

El último de los componentes electrónicos a utilizar es una pantalla LCD la cual es la encargada de mostrar los valores obtenidos mediante los sensores de pH y humedad. Esta pantalla es controlada mediante la placa de Arduino la cual también es encargada de controlar los demás sensores y contener la programación para garantizar su funcionalidad y su fiabilidad.

Figura 6. Pantalla LCD

2.4 Planos del Prototipo

El prototipo costa de dos partes las cuales fueron diseñadas y fabricadas en software en 3D mediante las cuales se va a basar el diseño en físico del prototipo. Para tener un mejor control debemos de tener aislado la parte controladora, es decir la parte donde estarán la tarjeta arduino con sus componentes y la pantalla LCD. A continuación se presenta el plano de la placa de control:

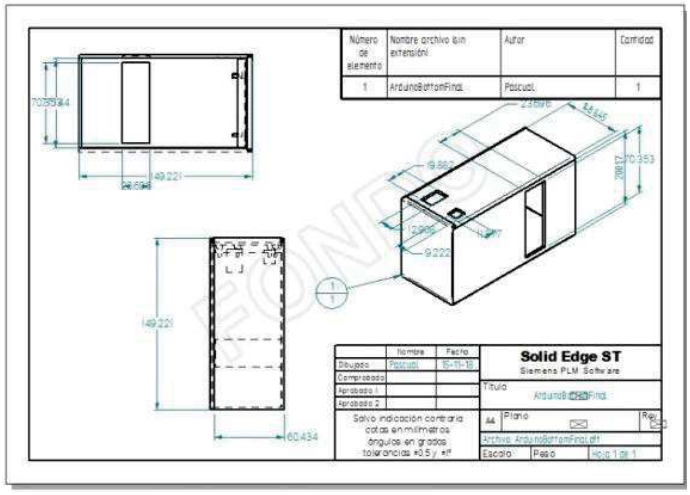


Figura 7. Planos del Centro de control

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 4, pp.35 - 46, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

La otra parte consta del centro de licuado. Los sensores de pH que vamos a utilizar solo analizan líquidos y en este caso vamos a utilizar una disolución a base de tierra con agua destilada, el agua destilada tiene un pH de 7 es decir neutro por lo que es ideal para poder realizar las pruebas. En esta parte vamos a tener lo que es el motor para el licuado así como la sonda de pH ya que la solución debe de ser analizada inmediatamente después de licuarla.

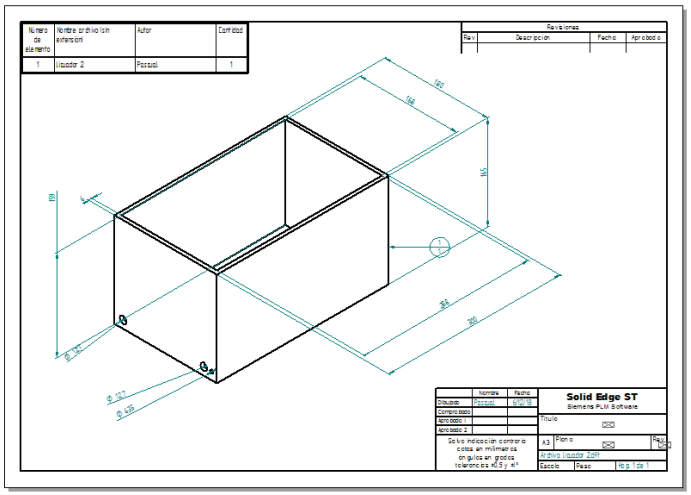


Figura 8. Planos del Centro de licuado

El análisis se realizara en un invernadero piloto ubicado dentro de las instalaciones del ITSLibres perteneciente a la carrera de ingeniería electromecánica. En este invernadero se siembran hortalizas pero el último cultivo ha sido el de jitomate, por lo cual se sabe aproximadamente el valor de pH que el suelo contiene. La humedad de este invernadero estará determinada por las temperaturas existentes entre la superficie de la tierra y a una profundidad de 30 cm. Con lo cual se determinara la dirección de la transferencia de calor y efectuar como tal una medición acertada sobre la humedad en el suelo en ese instante. A continuación se muestra en invernadero a escala realizado mediante una aplicación CAD 3D para poder realizar los análisis pertinentes y así tener una manipulación más próxima sobre su geometría:

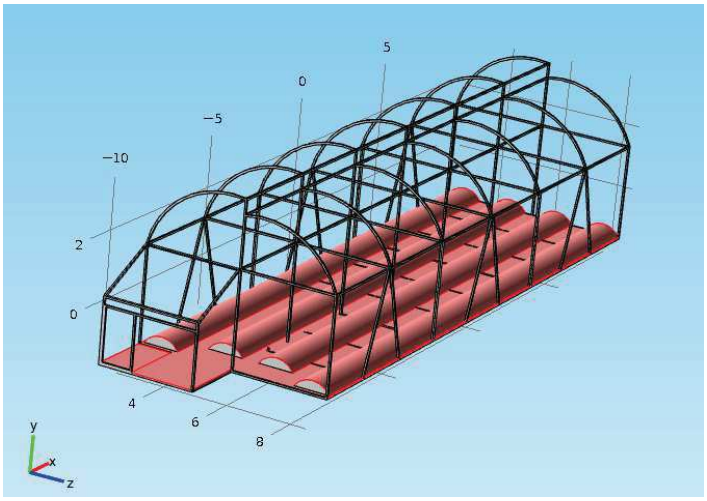


Figura 9. Invernadero creado en 3D a escala

Como se observa, la parte en rojo representa la temperatura máxima alcanzada por el suelo de aproximadamente **27 °C** en la superficie, mientras que la pequeña parte azul localizada debajo de la capa roja, representa la temperatura mínima existente a una profundidad cercana a las raíces de absorción que es de aproximadamente 13 °C lo que significa que la transferencia de calor es hacia abajo lo que provoca que se pierda humedad y el suelo se seque en el nivel de las raíces de las plantas.

Con este sencillo análisis podemos calcular los porcentajes de humedad con respecto a una profundidad óptima cercana a las raíces teniendo en cuenta las temperaturas superficial y de profundidad del suelo así como la dirección de la trasferencia de calor.

3. Resultados

Se logra la presentación del prototipo de manera que la lectura de los datos así como su obtención están de manera correcta generando así un valor de pH y humedad casi correcto de acuerdo a mediciones anteriores con equipos de calidad y producidos por empresas reconocidas.

3.1 Calibración y prueba experimental

Teniendo en cuenta que el prototipo este en funcionamiento optimo no puede comenzar a funcionar así de la nada, ya que no otorgaría valores verídicos ni mucho menos reales. Para poder realizar un análisis correcto lo que se debe de hacer es una calibración del sensor de tal manera que a partir de una sustancia con un pH estandarizado podamos realizar los cálculos dentro del programa y otorgar mediciones casi exactas.

Para la calibración del sensor utilizaremos la sonda de pH. Esta sonda contiene un pequeño recipiente el cual contiene un líquido de neutralización y limpieza de la sonda. Este liquido mantiene un pH igual a 4, este valor esta estandarizado y es el mismo en cualquier otra sonda de pH compatible con la plataforma, entonces a partir de ahí se realizan los cálculos necesarios para obtener los demás valores. Si al meter la sonda en agua destilada como prueba nos muestra un valor de 7, quiere decir que la sonda esta calibrada correctamente ya que el agua destilada es un elemento neutro y por lo tanto su valor siempre será 7. En caso de no obtener este valor o un valor aproximado, será necesario volver a calibrar con el líquido de prueba y ajustar la variación utilizando los potenciómetros que vienen en la interfaz de la sonda, los cuales ayudaran a reducir o aumentar la resistencia y la variación de la señal para obtener datos más precisos y verídicos.

Figura 10. Sonda de pH y solución para calibración

3.2 Errores Producidos

Los errores son comunes a la hora de probar un nuevo prototipo o la hora de inventar o implementar una mejora a algún dispositivo. Es algo que por lo general siempre ocurre en la mayoría

de los casos aunque se tenga un exhaustivo control de los materiales de construcción así como en su programación y armado y nuestro prototipo no es la excepción.

Dentro de los errores producidos se encontró la mala lectura de la librería para la pantalla LCD dentro de la programación, debido a que se utilizo la reducción I2C para evitar una confusión en los cables así como en la conexión de los mismos. Este problema fue encontrado en el proceso de programación por lo cual se conto con el tiempo necesario para poder repararlo y mejorarlo de manera que en la prueba final el margen de error fue mínimo incluso imperceptible otorgando una buena calidad en la presentación de los datos.

Otro error que se encontró fue en la unión de las interfaces de la sonda de pH con el sensor de humedad así como también con la pantalla LCD. Los tres programas son totalmente distintos y debían estar unidos y comunicados con la LCD. El problema fue que los datos obtenidos por los sensores no eran mostrados de manera clara y precisa en la LCD por lo que la lectura de los datos no era visible. Este problema también fue encontrado en el proceso programación por lo que también se tomaron las medidas necesarias así como las accesorias correspondientes para corregir este error y garantizando la funcionalidad del prototipo sin ningún problema.

Los errores siempre han existido y en todos los ámbitos, mas sin en cambio estos como tal no delimitan la calidad del prototipo o dispositivo sino que ponen a prueba nuestra capacidad para resolver estos problemas de manera rápida, precisa y fácil generando nuevos conocimientos y nuevas competencias.

3.3 Prueba de campo

El prototipo tiene como finalidad medir el pH y la humedad del suelo en un invernadero de hortalizas y como tal debe de mostrar los datos de manera visual. Una vez calibrado y probado con algunas sustancias el sensor de pH y después de haber hecho algunas pruebas con el sensor de humedad procedemos a realizar una prueba de campo en el invernadero ubicado en el ITSLibres para verificar la funcionalidad y la exactitud del prototipo antes de ser expuesto y presentado ante el personal competente.

Como primera prueba debemos de seleccionar una muestra de tierra obtenida del centro del invernadero y eliminar los residuos orgánicos o cualquier otro componente que pueda alterar la medición. También debemos eliminar las piedras y otras pequeñas gravillas ya que como la mezcla se va a licuar puede que estas dañen los sistemas mecánicos y alterar el pH.

Una vez obtenido la tierra limpia de otros residuos y componentes, se debe mezclar con agua destilada que es neutra para poder realizar la licuefacción y obtener una mezcla homogénea. Al tener esta mezcla y esperando que la tierra siga mezclada con el agua procedemos a insertar la sonda de pH dentro de la mezcla y esperar a que se muestren los resultados.

La prueba de medición de pH se realizo 10 veces con tierra de diferentes puntos del invernadero, cabe destacar que después de cada prueba, el sensor fue calibrado para evitar datos igualitarios en todas las pruebas generando así un pequeño margen de error de entre 0.5 y 2%. Los valores de las pruebas fueron comparados con el estándar general de pH para hortalizas de jitomate predeterminado, generando así una tabla de valores que muestran que los valores obtenidos por las pruebas son verídicos debido a su margen de error y tolerancia.

Figura 11. Realización de la muestra

Figura 12. Resultado obtenido

No. de Prueba	Valor de pH obtenido	Rango de pH estándar para jitomate
Prueba 1	**6.56**	**Entre 5.6 y 6.5**
Prueba 2	**6.31**	
Prueba 3	**6.45**	
Prueba 4	**5.88**	
Prueba 5	**5.75**	
Prueba 6	**6.15**	
Prueba 7	**6.49**	
Prueba 8	**6.90**	
Prueba 9	**6.62**	
Prueba 10	**6.28**	

Tabla 2. Valores Obtenidos durante las pruebas

Al observar los resultados pudimos comprobar que el pH en el suelo de un invernadero de hortalizas, específicamente de jitomate esta dentro del rango que se tiene para el cultivo de estas, lo que quiere decir que nuestro prototipo realiza una buena medición de pH comprobando así que el suelo de este invernadero se encuentra en condiciones optimas para el cultivo de jitomate.

Para la siguiente prueba utilizaremos el sensor de humedad de suelo, para lo cual debemos de extraer la tierra formando un pequeño agujero de aproximadamente 10 cm de diámetro y 30 cm de profundidad. Una vez realizado insertamos en sensor de humedad de manera que cubra de tierra las dos terminales y observar los datos que se muestran.

Al observar los datos obtenidos nos percatamos de que en ese instante el suelo del invernadero se encuentra en condiciones favorables en cuanto a la humedad ya que a pesar de que no se está regando constantemente, mantiene un valor de humedad cercano al 50%, pero los valores pueden variar dependiendo de la hora del día o incluso de la cantidad de agua suministrada anteriormente.

Figura 13. Medición de humedad y valores obtenidos

Como se pudo observar los datos obtenidos son muy verídicos y acertados indicando que el prototipo medidor de pH y humedad cumple con su función sin tener alguna interferencia y ninguna complicación siempre y cuando su uso y la aplicación de pruebas así como su calibración se lleven a cabo de manera ordenada, y sin ningún cambio establecido a lo anterior.

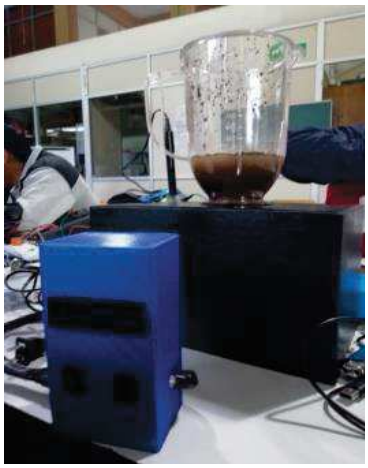


Figura 14. Prototipo Medidor de pH y Humedad

El presupuesto de este prototipo está basado en la factibilidad económica ya que un producto de este tipo tiene un precio elevado que van desde los $5,000 hasta los $25,000 por lo que los propietarios de bajos recursos no pueden adquirirlo y por lo tanto no pueden mejorar la calidad de sus

productos o aumentar su producción. También el presupuesto se hizo de manera que las piezas puedan ser remplazadas en caso de que exista una falla.

Tabla 3. Costos por implementación física de instrumentación y equipos.

No.	Concepto	Descripción	Cantidad	Monto
1	Metales , materiales y sistemas motrices	PLA (impresión 3D) color azul.	1 Kg	$400
		Motor a 12V de corriente directa	1	$30
		Recipiente de vidrio templado de 1L.	1	$150
		Silicón térmico Transparente	1	$100
		Motor a pasos mod. 28BYJ48	2	$200
2	Control y medición.	LCD 16x2 con interfaz i2c 2004a	1	$250
		Cableado tipo jumper Macho-hembra Kit	1	$100
		Botonera pequeñas o mediana	3	$70
		Kit sensor pH con tarjeta para arduino	1	$800
		Arduino Uno R3	1	$200
		Diodos LED (verde y rojo)	2	$10
		Cargador (regulador de voltaje) 5-12v	1	$300
		Kit de sensor de humedad de suelo YI69	1	$160
	Total			$2,770.00

4. Conclusiones

En conclusión podemos decir que el prototipo cumplió con su funcionamiento al estar construido a partir de la metodología propuesta y los objetivos planteados para el diseño y construcción del prototipo, ya se pudo observar un correcto funcionamiento de los sensores a partir de la programación propuesta para la tarjeta Arduino.

A pesar de todas las dificultades y limitaciones encontradas a lo largo de la construcción del prototipo las pruebas de campo mostraron una buena funcionalidad del prototipo ya que se realizaron varias pruebas durante el proceso de construcción.

Las recomendaciones que se tienen son el uso adecuado de este prototipo así como el mantenimiento adecuado y pertinente ya que genera una buena funcionalidad de prototipo desarrollado. En caso de que un elemento electrónico falle o en otras circunstancias no funcione, este debe de ser remplazado siguiendo ciertas instrucciones para evitar dañar los demás dispositivos y ampliar el tiempo de vida de este prototipo que aunque es muy sencillo permite obtener datos de gran valor para ciertas funciones y actividades.

Hasta el momento el prototipo solo realiza la medición de pH y humedad mediante la sonda y el sensor de humedad por conductividad eléctrica. Una de las mejoras que se proponen es reducir el tamaño del prototipo, de manera que sea más portátil y su peso sea menor. Otra mejora que se propone es utilizar dispositivos de más alta precisión y de menor tamaño para garantizar una medición correcta y acertada, aumentando la calidad del producto pero también cuidando la economía del comprador. Por lo tanto el prototipo puede tener diversas aplicaciones en el futuro, una de ellas es la activación del riego de manera automática ya que si se detecta una deficiencia en la humedad se realizara una acción para que se active el riego. Otra futura aplicación es la generación de una tabla de fertilizantes a partir de pH, por lo que el propietario podrá saber si se necesita poner el suelo acido o alcalino dependiendo del valor proporcionado.

5. Referencias

[1] Gloria Alexandra Hernández González y Cesar Leonardo Romero Sánchez. *"Análisis de la situación de los invernaderos de la Asociación de Tomateros en Garagoa (Boyacá)".* Tesis. Universidad de la Sabana. Bogotá D.C. Colombia. 2002.

[2] Hernán Octavio Díaz Sarmiento y Oscar Fabián Solano Rojas. *Diseño y simulación del control climático para un invernadero y base de datos de registro*. Tesis. Facultad de Ingeniería. Universidad de la Sallé. Bogotá D.C. Colombia. 2006.

[3] Jesús Núñez, Julio César Carvajal y Luis Armando Bautista. *El TLC con Estados Unidos y su impacto en el sector agropecuario Colombiano: Entre esperanzas e incertidumbres*. En: LEX UDES, 2004.

[4] Paula Ramos Giraldo, Mauricio García Navarro, Juan Hoyos Suárez Carlos Oliveros Tascón y URIBE, Juan Sanz. *Aplicación de una Metodología Estructurada para el Diseño de un Sistema de Cosecha Selectiva de Café*. En: Scientia et Technica, tomo 20, no 1, 2015, págs. 10–19. ISSN 0122-1701.

[5] Gobernación De Risaralda. Plan *Frutícola Nacional, Desarrollo de la Fruticultura en Risaralda*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006. 17

[6] Zhang, Shanwen y ZHANG, Chuanlei. *Orthogonal Locally Discriminant Projection for Classification of Plant Leaf Diseases*. En: Computational Intelligence and Security (CIS), 2013 9thInternational Conference on, 2013, págs. 241–245.

[7] Zhou, Rong, et al. *Early Detection and Continuous Quantization of Plant Disease Using Template Matching and Support Vector Machine Algorithms*. En: Computing and Networking (CANDAR), 2013 First International Symposium on, 2013, págs. 300–304.

[8] Vijay, N. *Application of sensor networks in agriculture*. En: Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2012), IET Chennai 3rd International on, 2012, págs. 1–6.

[9] Bhargava, K.; Kashyap, A. Y Gonsalves, T.A. *Wireless sensor network based advisory system for Apple Scab prevention*. En: Communications (NCC), 2014 Twentieth National Conference on, 2014, págs. 1–6.

[10] Sone, Hironao. AI *based agriculture support system with precisely deployed versatile sensors and sensor network*. En: Advanced Intelligence and Awarenss Internet (AIAI 2010), 2010 International Conference on, 2010, págs. 4–4.

[11] Pinto Ríos. Wilson Daniel. *"Monitoreo de Cultivos con Redes de Sensores XBEE, Arduino, Y Dispositivos de Medición de Suelos"*. Tesis, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Risaralda, Colombia, 2015.

[12]*Instalación del software Arduino*, [Online]. Available: http://www.cromalight.com/es/instalacion-del-software-arduino-en-el-ordenador-

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 5, pp.47 - 60, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Dispositivo Mecatrónico Aplicado a la Enseñanza de la Mecánica de Sólidos

[1]Candia García F., [2]Ambrosio Lázaro R.C., [3]Flores Méndez J., [4]Vivaldo de la Cruz I. y [5]Cano Melchor S. de A.

[1, 5]Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
[2, 3, 4]Facultad de Ingeniería en Sistemas Automotrices, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
filinc@hotmail.com

Resumen

Este trabajo permite aportar una solución práctica a la problemática de bajo rendimiento académico que se presenta en las IES por la baja asociación de los conceptos de la asignatura de mecánica de sólidos y su aplicación al diseño mecánico o procesos de manufactura. Es decir, entre las asignaturas formativas y de especialidad. El objetivo es asociar mediante un modelo didáctico impreso en 3D, el cálculo analítico de las propiedades geométricas, del esfuerzo normal, cortante y de torsión con su representación o contexto físico. La propuesta didáctica es experimental, siendo la metodología descriptiva a través de los diagramas de cuerpo libre con su representación física. El método utilizado es científico deductivo, que configuró actividades didácticas concurrentes, las técnicas empleadas fueron las tecnologías de simulación CAD/CAE/CAM, integradas con la técnica de prototipado rápido por impresión en 3D. Los datos se recolectaron por medición y ejercitación directa en el desarrollo práctico de cada instrucción. El desarrollo incluye la enseñanza de los conceptos por medio de actividades instruccionales, donde se inicia con el abordaje de las ecuaciones analíticas y un ejemplo de cálculo, posteriormente con un modelo de prototipo por impresión en 3D, se muestra la representación física (propiedades geométricas del sólido) y se asocian las condiciones de trabajo (restricciones y fuerzas) contra los efectos que se provocan (esfuerzo y deformación). Los resultados logrados son una alta aproximación en la configuración de las propiedades geométricas determinadas analíticamente con los valores medidos de su representación física impresa en 3D. Además, se observó que las ejemplificaciones físicas de las condiciones de contorno (fuerza y restricciones) son muy aproximadas a las indicadas en los diagramas de cuerpo libre. Finalmente se cuenta con una integración didáctica a través de las actividades instruccionales (que se diseñaron de manera concurrente a una finalidad industrial) de un dispositivo didáctico impreso en 3D, que asocia los conceptos analíticos con los conceptos físicos de la materia de mecánica de sólidos.

Palabras clave: CAD/CAE/CAM, Material didáctico, Impresión 3D, Esfuerzo-Deformación, Prototipado rápido.

1. Introducción

Este trabajo se ubica en el área de conocimiento de la ingeniería y tecnología de acuerdo a la clasificación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y permite dar solución a la problemática identificada por apreciación personal de los autores en una Institución de Educación Superior (IES), la cual se puede generalizar hacia otras IES como un bajo rendimiento académico en materias como diseño mecánico o procesos de manufactura, por una baja asociación (analítica-física) de los conceptos de la asignatura de mecánica de sólidos. Es decir, entre las asignaturas formativas y de especialidad dentro de un curriculum en ingeniería. Los conceptos en los que se observó bajo rendimiento académico, son los valores numéricos que se obtienen del diagrama esfuerzo-deformación (figura 1), como lo son: el esfuerzo último (S_U), el esfuerzo de fluencia (S_Y) y el esfuerzo de falla (S_F) [1], [2] de los cuales el alumno no hace diferencia, cuando se le solicita diseñar o

manufacturar, por ejemplo; el eje excéntrico (cigüeñal) de una troqueladora el cual será sometido a fuerzas cortantes y de torsión.

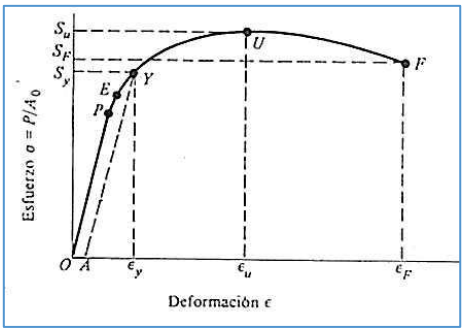


Figura 1.- Diagrama Esfuerzo-Deformación.

El objetivo es mediante un modelo didáctico impreso en 3D asociar el cálculo analítico; de las propiedades geométricas, del esfuerzo normal, esfuerzo cortante y esfuerzo por torsión, con su consecuencia física (cambio de geometría) por ejemplo la deformación axial o angular. Para lograr el objetivo se han diseñado y desarrollado ocho secuencias instruccionales que concurren en un modelo didáctico impreso en 3D llamado “Troqueladora para identificar/calcular esfuerzos y deformaciones”.

La propuesta didáctica es experimental, siendo la metodología descriptiva a través de los diagramas de cuerpo libre que se utilizan para simplificar la representación física de un problema de diseño mecánico o de fabricación por procesos de manufactura. A partir de los diagramas de cuerpo libre se han diseñado materiales didácticos los cuales son empleados en las secuencias instruccionales, para favorecer la comprensión de los alumnos, de las cuales se menciona el título de cada una de ellas:

1. Determinación del centroide
2. Determinación del centro de masa
3. Determinación del momento de inercia
4. Calculo de esfuerzos normales y cortantes
5. Prueba de tensión
6. Prueba de torsión
7. Prueba de flexión
8. Prueba de pandeo

En cada una de ellas la didáctica empleada consiste en la determinación analítica de cada concepto involucrado, cuando se obtiene el resultado se coloca en una tabla (tabla 1a y 1b). Posteriormente con apoyo del material didáctico (figura 2) se ejecutan las instrucciones y se obtiene el resultado que se coloca en una tabla comparativa. La información y datos obtenidos permiten al estudiante realizar una comparativa-asociativa de forma estructurada, fundamentada en la teoría constructivista.

Para motivar al estudiante a involucrarse en este proceso se hace uso de la tecnología CAD/CAE/CAM, con la cual se obtiene una simulación virtual (figura 3) por medio del Método del Elemento Finito (MEF) de las consecuencias a las cuales se tendrá que enfrentar si no considera la adecuada relación lineal (mediante la ley de Hooke) de los esfuerzos y deformaciones en el diseño mecánico o los procesos de manufactura.

Tabla 1a.- Concentrado de resultados para el centroide.

Resultados	Analítico	Experimental	CAD/CAE/CAM
	(54.8, 36.6)	(54.00, 37.00)	(54.84, 36.69)

Tabla 1b.- Concentrado de resultados para el esfuerzo normal y cortante.

Modelo de elemento finito	Máximo esfuerzo normal 2.91 MPa (N/mm^2)	Máximo esfuerzo cortante 7.41 MPa (N/mm^2)
Modelo de elemento finito	Esfuerzo normal promedio 0.317367 MPa (N/mm^2)	Esfuerzo cortante promedio 0.837321 MPa (N/mm^2)
Calculo analítico	Esfuerzo normal 0.436 MPa (N/mm^2)	Esfuerzo cortante 0.847 MPa (N/mm^2)

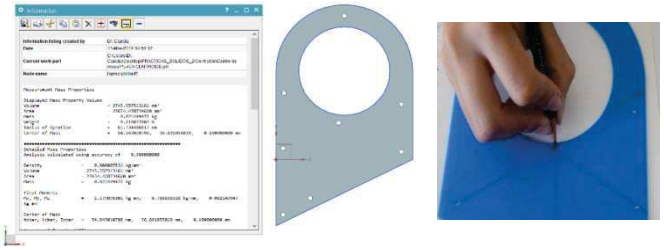
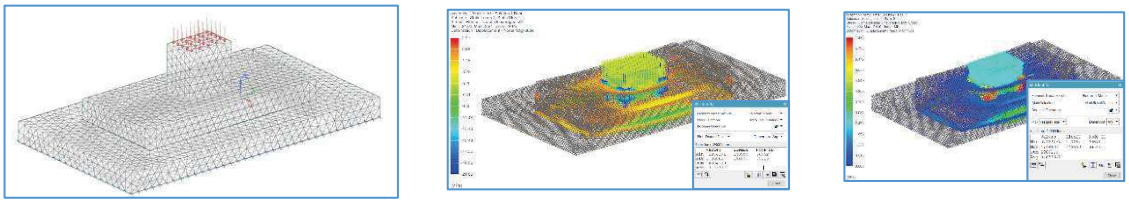


Figura 2.- Determinación del centroide tecnología CAD y método experimental.



a) Modelo de elemento finito b) Resultados Esfuerzo normal c) Resultados esfuerzo cortante

Figura 3.- Determinación del esfuerzo normal y cortante por el MEF.

En el apartado de resultados y discusión con la información obtenida de las secuencias instruccionales se diseñó una actividad integradora que consiste en la simulación digital mediante la tecnología CAD/CAE/CAM [3] y la fabricación por impresión 3D de una "Troqueladora para identificar/calcular esfuerzos y deformaciones" (figura 8 y 9) con la cual el estudiante interactúa relacionando cada elemento constructivo con los esfuerzos y deformaciones a las cuales se ve involucrado durante su proceso de fabricación. Por ejemplo: si el elemento de la matriz se obtuvo por maquinado el estudiante debe indicar cuál es el criterio de selección de las herramientas de corte involucradas en el proceso.

Se ha concluido que con el uso de material didáctico simulado con herramientas digitales CAD/CAE/CAM e impreso en 3D mediante actividades instruccionales, es posible lograr una sólida integración constructivista, que asocia los conceptos analíticos con los conceptos físicos de las asignaturas formativas y de especialidad en las IES que imparten programas de estudio en ingeniería.

1.1. Marco conceptual

El esfuerzo de diseño es aquel nivel de esfuerzo que puede desarrollarse en un material, al tiempo que se asegura que el miembro que soporta la carga no falle. Para calcular el esfuerzo de diseño, deben especificarse dos factores: el factor de diseño N y la propiedad del material en la que se basará el diseño. El factor de diseño N es el número entre el que se divide la resistencia registrada del material para obtener el esfuerzo del diseño σ_d. Pueden utilizarse las siguientes ecuaciones para calcular el esfuerzo de diseño para un cierto valor de N:

$$\sigma_d = \frac{S_Y}{N} \quad \text{basado en la resistencia a la fluencia} \qquad (1)$$

$$\sigma_d = \frac{S_U}{N} \quad \text{basado en la resistencia última} \qquad (2)$$

Para mostrar el valor de los esfuerzos de diseño se han utilizado, las gráficas del esfuerzo normal vs deformación unitaria (figura 4) y de la fuerza cortante vs deformación angular (figura 5), que fueron obtenidas por experimentación mediante las secuencias instruccionales.

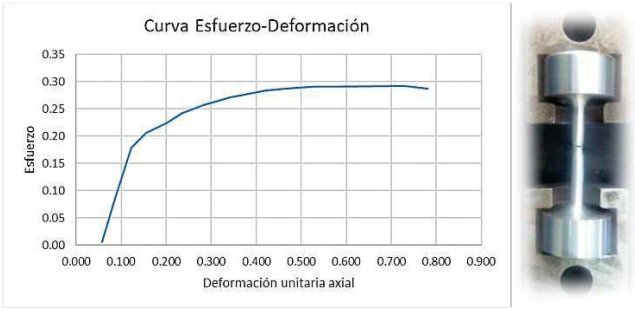


Figura 4.- Curva esfuerzo normal-deformación unitaria axial, para el aluminio.

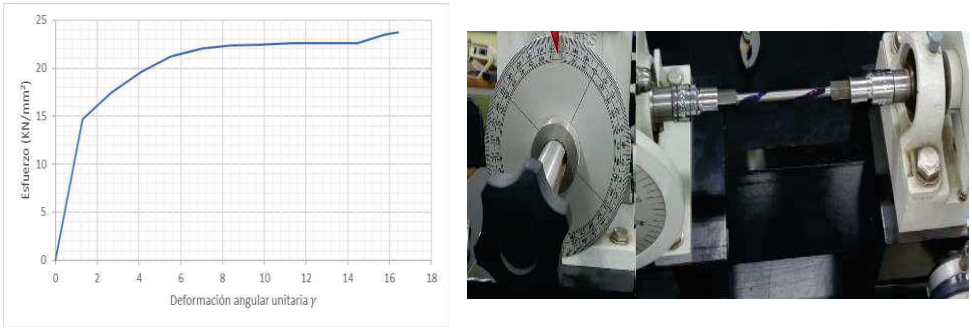


Figura 5.- Curva Esfuerzo-Deformación unitaria angular, para el aluminio.

Para materiales dúctiles sometidos a cargas estáticas, el esfuerzo de diseño generalmente se basa en la resistencia a la fluencia; mientras que, para materiales dúctiles bajo cargas repetidas se emplea la resistencia última, siendo entonces referido el concepto de factor de diseño [4] (tabla 3, 4 y 5).

Tabla 2.- Criterios para esfuerzo de diseño; esfuerzos normales directos.

Forma de carga	Material dúctil	Material quebradizo
Estática	$\sigma_d = \frac{S_U}{2}$	$\sigma_d = \frac{S_U}{6}$
Repetida	$\sigma_d = \frac{S_U}{8}$	$\sigma_d = \frac{S_U}{10}$
De impacto o de choque	$\sigma_d = \frac{S_U}{12}$	$\sigma_d = \frac{S_U}{15}$

Tabla 3.- Diseño por esfuerzo de reglamentos seleccionados, esfuerzos normales directos; cargas estáticas en estructuras de construcción

Acero estructural (AISC)
$\sigma_d = \frac{S_Y}{1.67} = 0.60S_Y$ *o* $\sigma_d = \frac{S_U}{2.00} = 0.50S_U$
el que sea menor
Aluminio (Aluminum Association)
$\sigma_d = \frac{S_Y}{1.65} = 0.61S_Y$ *o* $\sigma_d = \frac{S_U}{1.95} = 0.51S_U$
el que sea menor

Tabla 4.- Criterios de esfuerzo de diseño para la determinación de la fuerza cortante en materiales dúctiles.

Forma de carga	$T_d = \frac{S_{YS}}{N} = 0.5$	$\frac{S_Y}{N} = \frac{S_Y}{2N}$
Estática	Use N=2	$T_d = \frac{S_Y}{4}$
Repetida	Use N=4	$T_d = \frac{S_Y}{8}$
Impacto	Use N=6	$T_d = \frac{S_Y}{12}$

Tabla 5.- Estimaciones para la resistencia última a cortante (S_{us})de materiales quebradizos.

Factor a cortante	**Material**
$S_{us} = 0.65S_U$	Aleaciones de Aluminio
$S_{us} = 0.82S_U$	Acero
$S_{us} = 0.90S_U$	Hierro maleable y aleaciones de cobre
$S_{us} = 1.30S_U$	Hierro colado gris

2. Método

La propuesta didáctica es experimental, el método utilizado fue científico deductivo que configuro las actividades concurrentes, las técnicas empleadas fueron las tecnologías de simulación digital CAD/CAE/CAM, integradas con la técnica de prototipado rápido por impresión en 3D. Los datos se recolectaron por medición y ejercitación directa en el desarrollo práctico de cada instrucción. Las actividades instruccionales se fundamentan en el constructivismo a partir del desarrollo de Ambientes Interactivos de Aprendizaje.

2.1 La orientación de la didáctica

Actualmente en las IES existe una problemática grave cuando se motiva la realización de cambios académicos mediante certificaciones en competencias dentro del curriculum de un sistema educativo. Es de esperar que mediante la educación basada en competencias se busque reducir y especificar los contenidos educativos con una limitada interpretación del docente, situación que provoca que el complejo sistema de la evaluación también se simplifique a un término de calificación con una escala numérica. Este aspecto conduce a una rápida descalificación -de los egresados de la educación superior-, en el sector laboral, ya que, al ser conducidos durante su formación y evaluación a procesos mecanicistas, se acostumbran a ser evaluados a través de un checklist o una lista de cotejo. Que muestra solo una estrecha parte de su cumulo educativo y minimiza su potencial, orillando con ello al egresado a un estado de frustración e insatisfacción, por la reducción vocacional en la cual se ve inmerso. Asimismo, el desarrollo del docente en los aspectos didácticos presenta deficiencias y una alta necesidad de capacitación/actualización [5].

Por lo tanto, el impacto de la actual propuesta integradora de un paquete de material didáctico que se presenta en este trabajo es alta ya que tiende a la sistematización. Siendo la intención de los autores a través de este documento proporcionar una guía ilustrada de la nueva orientación de la didáctica hacia la enseñanza de las ciencias. Para ello se requiere que la función y formación docente sea reconceptualizada, desde una perspectiva alterna a la formación en competencias, que se deriva de los actuales requerimientos de certificaciones y acreditaciones, tanto nacionales como internacionales. Bajo esta perspectiva se entiende al método docente como un conjunto de decisiones sobre los procedimientos a emprender y sobre los recursos a utilizar en las diferentes fases de un plan de acción que, organizados y secuenciados coherentemente con los objetivos pretendidos en cada uno de los momentos del proceso, nos permiten dar una respuesta a la finalidad última de la tarea educativa, que se encuentra explicita en los fines de la educación [6].

Por la finalidad del artículo 3° “formar personas virtuosas mediante la educación”, se decidió asociar la formación docente con el desarrollo de material y prototipos didácticos propios (endógenos) porque a la hora de enseñar ciencias se cuenta con elementos importantes como la creatividad, motivación, curiosidad y la experiencia cotidiana de los estudiantes, los cuales pueden ser explorados fácilmente, de una manera lúdica y didáctica [7], con el desarrollo de prototipos didácticos que se integran a secuencias constructivistas del aprendizaje basado en proyectos (ABP).

El desarrollo de una didáctica propia no solo establece un punto de apoyo para el aprendizaje de los alumnos también es capaz de encausar la formación docente universitaria, para mejorar la calidad de la enseñanza de la educación superior. Siendo necesario incrementar las posibilidades de una constante superación del docente que sea pertinente con los contenidos curriculares de los nuevos planes de formación docente en su modalidad por competencias. Asimismo, el componente investigativo adquiere una connotación especial en los nuevos planes de formación, al propiciar que los docentes, desde los primeros años, desarrollen habilidades para el trabajo científico durante su práctica docente, vinculándose a la solución de los problemas reales existentes en el medio donde actúan, es decir, la escuela, la familia y la comunidad [8].

En el documento de integración del Modelo de Universitario Minerva (MUM) [9], se hace énfasis que la dimensión sociocultural regional y nacional debe conducir el proceso de aprendizaje enseñanza. Siendo el MUM un modelo que se ajusta a la influencia de la globalización, el neoliberalismo y la sociedad del conocimiento, las propuestas didácticas deben incluir como criterios clave para organizar la educación superior los determinados por la UNESCO siendo estos: la pertinencia, la calidad y la internacionalización.

Este proyecto busca minimizar mediante el desarrollo de material didáctico, la debilidad de la BUAP en cuanto a la falta de interacción orgánica entre la docencia y la propuesta didáctica realizada en los posgrados, los institutos de propuesta didáctica y las facultades [9]. Como el humanismo critico es el eje rector en que descansa el quehacer universitario. La libertad de catedra apoyada por el ABP, se ejerce como un derecho académico de libertad de pensamiento y de posturas ideológicas acotado por el modelo educativo permite la incorporación de elementos didácticos de alto impacto que complemente los contenidos curriculares.

El MUM como guía para el desarrollo de materiales didácticos se interpreta que la orientación de la estructura curricular debe ser social-participativa, que promueve el aprendizaje basado en proyectos y la promoción del trabajo equipos multidisciplinarios, como dos estrategias que permearán el quehacer académico de todos los programas educativos. Esta alineación es estratégica porque la realización de un paquete didáctico, asesorado y avalado por un docente o grupo de docentes, es una opción de titulación, que hace aún más pertinente el desarrollo de materiales didácticos de manera endógena. Entendiendo que el desarrollo endógeno se enfoca en el crecimiento interno de la organización (país, región, comunidad, institución) cuando surge la necesidad de terminar con la dependencia dada por el ambiente externo.

El poder configurar una propuesta pedagógica-didáctica sustentada en un Modelo de Integración Social (MIS) conduce a la adopción de un modelo educativo sustentado en el constructivismo sociocultural que jerarquiza el papel de los significados del aprendizaje. Por ello en el apartado de estructura curricular del MUM [10], se privilegia la organización del curriculum con una orientación social-participativa. También la configuración de un curriculum correlacionado que favorece la integración de las asignaturas que tradicionalmente se habían tratado de manera individual. El curriculum transversal constituido por cinco ejes que se entrelazan y a su vez abrigan a lo largo en tiempo y espacio, al curriculum correlacionado, intersectándolo en los aspectos cognitivos y formativo valórales (figura 6). En este trabajo se ha considerado que el MUM la propuesta didáctica se marca como una vinculación entre los tres niveles educativos (EMS, ES y posgrado) que favorece la educación inter, multi y transdisiplinaria; además permitirá el despliegue de las potencialidades del profesorado, la homogeneización y el enriquecimiento de los niveles académicos, así como la optimización en el uso de la infraestructura [9].

El mantener una constante generación de materiales didácticos es relevante, ya que en los principios del MUM existe interés por la discusión y generación de estrategias didácticas y pedagógicas para la enseñanza de los contenidos programáticos y su evaluación académica, la generación de líneas de propuesta didáctica educativa, la temporalidad de los proyectos, los criterios de calidad de las investigaciones, la aplicabilidad de los resultados en corto, mediano y largo plazo y la generación de recomendaciones didácticas y pedagógicas aplicables a los niveles medio superior y superior para el mejoramiento del proceso aprendizaje-enseñanza, en función de las líneas de generación y aplicación del conocimiento los cuales requieren implementar las correspondientes estrategias y acciones que permitan desarrollar la instrumentación determinada.

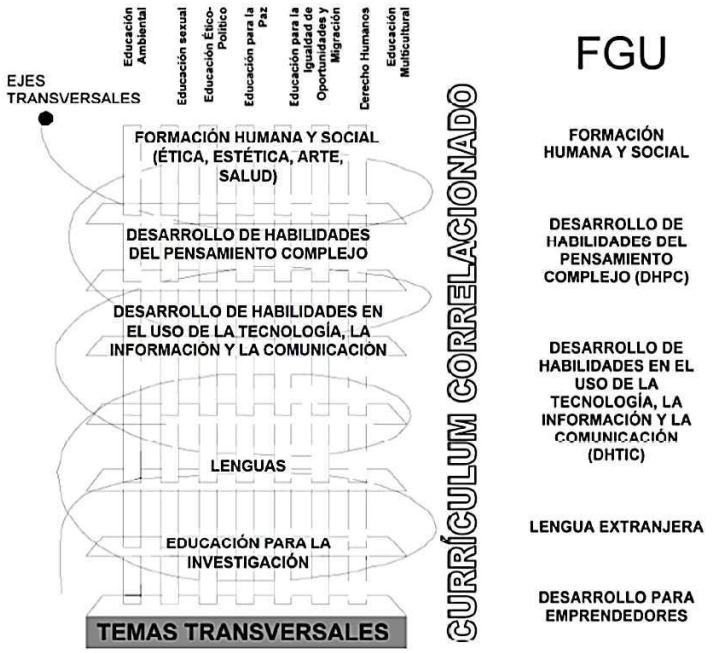


Figura 6.- Los ejes trasversales: aprendizajes para la vida colección: educación al día-didáctica pedagógica, tomado de [10]**.**

Finalmente en la revisión/actualización del MUM [11], con respecto a la consolidación de una educación basada en competencias se habla de frente a estos cambios. La Universidad enfrenta el desafío de incorporar enfoques que orienten a la resolución de problemas para crear nuevos conocimientos, relacionar saberes disciplinarios e integrarlos a través de competencias profesionales. En este contexto, incorporar un enfoque por competencias que tenga como base los principios del pensamiento sistémico-complejo enriquece las formas de abordar el aprendizaje y la enseñanza considerados en los fundamentos y principios básicos del MUM. “El enfoque sistémico complejo le da primacía a la formación de personas integrales con compromiso ético, que busquen su autorrealización, que aporten al tejido social y que, además, sean profesionales idóneos y emprendedores” (Tobón, 2007), citado en [9].

Consolidar el MUM requiere una didáctica que permita relacionar los contenidos posibles con las estrategias metodológicas que permitirán entrelazar los dominios conceptuales, procedimentales y actitudinales y que serán evaluados desde una visión de proceso con evidencias específicas. Promover la gestión curricular desde un enfoque por competencias implica que los gestores y docentes tengan claridad sobre el sentido que tiene participar en esquemas de formación centrados en el aprendizaje de los estudiantes. En la relación permanente que existe entre el saber ser, aprender, convivir y hacer, tener la comprensión sobre el desarrollo de una competencia como un proceso gradual que se despliega en ambientes de cambio e incertidumbre. Desde esta perspectiva, la gestión por competencias es un elemento clave para participar en la construcción de la sociedad del conocimiento y de la información y no canalizarla a un reduccionismo educativo.

3. Desarrollo

El desarrollo incluye la enseñanza de los conceptos por medio de actividades instruccionales, donde se inicia con el abordaje de las ecuaciones analíticas y un ejemplo de cálculo, posteriormente con un modelo de prototipo por impresión en 3D, se muestra la representación física (propiedades geométricas del sólido) y se asocian las condiciones de trabajo (restricciones y fuerzas) contra los efectos que se provocan (esfuerzo y deformación). En el siguiente apartado se presenta como ejemplo el desarrollo de una secuencia instruccional.

3.1 Secuencia instruccional

Momento de inercia

Objetivo: Relacionar los conceptos de momento de inercia de manera analítica y física.
Requerimientos previos (conocimientos):

- Definición de momento de inercia
- Cálculo de momento de inercia

Marco teórico

El momento de inercia es similar a la inercia, excepto en que se aplica a la rotación en vez de al movimiento lineal, y además depende de la distribución de la masa en el objeto. Cuanto más lejos está la masa del centro de rotación, mayor es el momento de inercia.

$$I = \sum m_i r_i^2 \qquad (3)$$

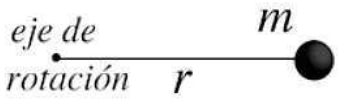


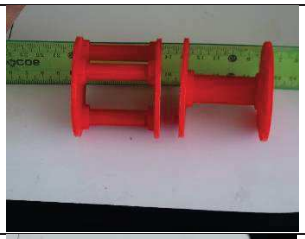
Figura 7.- Diagrama de cuerpo libre del momento de inercia.

Producto

Tabla comparativa de los momentos de inercia calculados analíticamente y cuestionario explicativo sobre los conceptos del momento de inercia.

Formato 1.-Desarrollo de la instrucción.

Paso 1. Identificar el material requerido: ✓ Material impreso en 3D ✓ Superficie lisa firme (libreta, libro, carpeta) ✓ Regla	
Paso 2. Un integrante deberá mantener la superficie lisa con un ángulo α con respecto a la mesa de trabajo (Utilice los bloques proporcionados).	

Paso 3. Ubicar los modelos alineados en la parte superior de la superficie y detenerlos con ayuda de la regla.	
Paso 4. Mover la regla lo más rápido posible de manera que se permita; al mismo tiempo, el inicio de la carrera de ambos modelos.	
Paso 5. Repetir los pasos 4, 5 y 6 aumentando el ángulo α de la superficie con respecto de la mesa de trabajo, las veces que el equipo considere necesarias. (Utilice los bloques proporcionados)	

Anexo 1

Formato para documentación de los resultados obtenidos analíticamente.

Formato 2.- Para documentar los datos calculados.

	Volumen (mm^3)	**ρ (gr/mm^3)**	**Masa (gr)**	**Radio (r) (mm)**	**r^2 (mm^2)**	**Inercia (mm^2*gr)**
Masa concentrada						
Masa distribuida						

Anexo 2

Cuestionario sobre la determinación experimental del momento de inercia.

1. ¿Cuál de los modelos termino el recorrido primero en las pruebas?
2. ¿Por qué consideras que ocurrió esto?
3. Según los cálculos realizados, ¿Qué modelo es el que debería llegar primero?
4. ¿Los cálculos y las pruebas coinciden en el modelo que debe llegar primero? ¿Por qué crees que sucede esto?

El aporte o referente teórico obtenido de la ejercitación experimental del momento de inercia, permite que el estudiante comprenda el alcance que tiene el momento de inercia en la determinación del balanceo estático y dinámico.

3.2 Resultados

Los resultados logrados son: una alta aproximación en la configuración de las propiedades geométricas determinadas analíticamente con los valores medidos por medio de su representación física impresa en 3D. Además, se observó que las ejemplificaciones físicas de las condiciones de contorno (fuerza y restricciones) son muy aproximadas a las indicadas en los diagramas de cuerpo libre.

La integración propuesta y fabricada (figura 9) permite una clara, rápida y precisa identificación de los esfuerzos: normal, cortante, de aplastamiento y de torsión. La determinación del momento de

inercia del volante es también una objetiva referencia de la fuerza que puede aplicar el prototipo didáctico. Por lo tanto, la secuencia instruccional inicia con el cálculo del:

- ✓ Centro de masa en la estructura.
- ✓ Momento de inercia del volante de inercia.
- ✓ Esfuerzo normal que ejerce el dado sobre la matriz.
- ✓ Esfuerzo cortante sobre el pasador.
- ✓ Esfuerzo de aplastamiento sobre el acoplamiento de la leva.
- ✓ El par torsor que transmite el volante de inercia al cigüeñal.

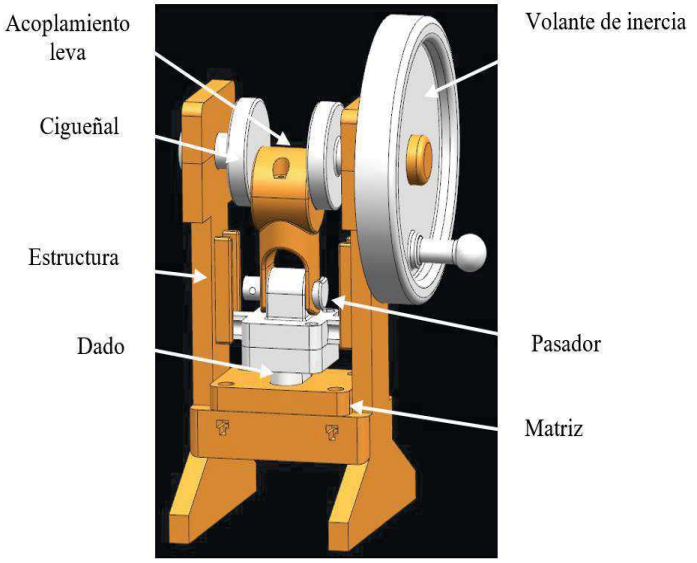


Figura 8.- Troqueladora como prototipo didáctico en simulación digital.

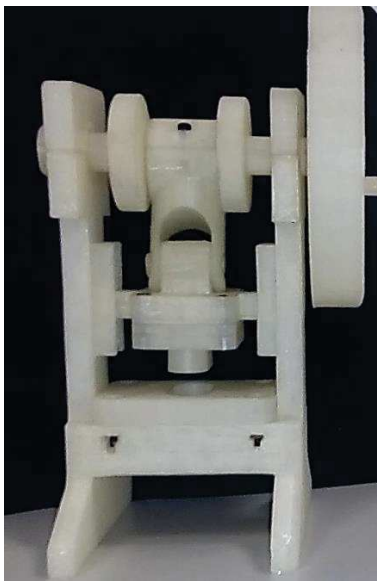


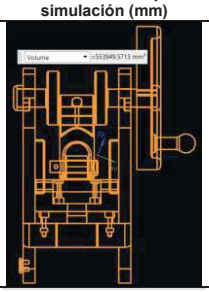
Figura 9.- Troqueladora como prototipo didáctico en impresión 3D.

El modelo realizado por simulación digital mediante tecnología CAD/CAE/CAM (figura 8), permite adicionar el componente motivacional hacia el alumno, debido a que es posible proporcionar en un solo escenario la representación de máquinas, mecanismos y dispositivos de manera completa y organizada. Además, favorece la asociación de los cálculos analíticos con su representación gráfica. La impresión 3D (figura 9) agrega además del componente motivacional la manipulación y desarrollo de la habilidad motriz o motora y visual sobre el funcionamiento y los alcances de la cinemática y dinámica del dispositivo.

La asociación de la representación analítica mediante los diagramas de cuerpo libre y las ecuaciones teóricas con la simulación digital se refuerza de manera constructivista mediante el prototipado rápido, aludiendo el proverbio chino de Confucio “"Dime algo y lo olvidaré, enséñame algo y lo recordaré, hazme participe de algo y lo aprenderé”, para lo cual Comenio formaliza en su máxima sobre didáctica “en la cual coloca al niño como centro del fenómeno educativo, haciendo que todo concurra a su servicio: maestros, textos, aulas y métodos. A esta obra se debe la creación de la escuela popular, en la que todos tienen acceso a la educación: hombres y mujeres, pobres y ricos, párvulos y adultos, superdotados y atípicos. Aquí se implanta el método activo (aprender haciendo) por el que el alumno crea su propio conocimiento con la memoria de la experiencia, antes que con la memoria de la palabra [12]”.

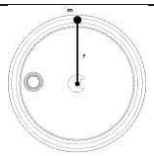
Como un primer paso requiere que el estudiante determine el centro de masa del prototipo, la tabla 6, muestra los requerimientos para ello, resalta en esta tabla el empleo de la técnica CAD/CAE/CAM para determinar el centro de masa y dar una referencia bastante clara sobre el concepto a determinar de manera analítica.

Tabla 6.- Formato para determinar el centro de masa.

TROQULADORA	Centro de masa por simulación (mm)	Figuras	Volumen (V mm^3)	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$	$\bar{x}V$	$\bar{y}V$	$\bar{z}V$	$\bar{X}$ mm	$\bar{Y}$ mm	$\bar{Z}$ mm
												
										$\frac{\Sigma \bar{x}V}{\sum V}$	$\frac{\Sigma \bar{y}V}{\sum V}$	$\frac{\Sigma \bar{z}V}{\sum V}$
	X= -88.555 Y= 1.159 Z= 211.536		$\sum V$				$\Sigma \bar{x}V$	$\Sigma \bar{y}V$	$\Sigma \bar{z}V$			

El siguiente paso (tabla 7), el cual permite determinar la fuerza inicial se considera que el prototipo es sólido en todos sus elementos, sobre todo en el volante de inercia que proporciona la masa de la cual se determina el par torsor y posteriormente la fuerza por medio de la segunda ley de Newton condiciones indispensables para el análisis de los esfuerzos y las deformaciones.

Tabla 7.- Formato para determinar la fuerza por aplicar.

Pieza Volante de inercia	Diagrama cuerpo libre	Simulación momento de inercia	Densidad del ABS gr/mm^3	Volumen mm^3	Masa gr	Radio mm	Momento de Inercia Calculado gr·mm^4	Momento de Inercia simulado gr·mm^4	Fuerza N
								Ixc= 2589.6 Iyc= 1323.8 Izc=1370.8	

Con apoyo de los datos de las propiedades del material ABS [13] obtenidos por medio de la curva esfuerzo deformación del ABS (tabla 8 y figura 10), se determina el esfuerzo de diseño, mediante las ecuaciones 4 y 5, el esfuerzo de diseño será comparado contra el esfuerzo de fluencia y último, para determinar si el dispositivo se encuentra en una condición de diseño favorable o no favorable.

$$\sigma_d = \frac{S_Y}{1.67} = 0.60 S_Y \tag{4}$$

$$\sigma_d = \frac{S_U}{2.00} = 0.50 S_U \tag{5}$$

Tabla 8.- Propiedades mecánicas experimentales del ABS.

Probeta ABS	Resistencia a la Fluencia [MPa]	% de Deformación a la Fluencia	Resistencia última a la Fluencia [MPa]	% de Deformación última a la Fluencia	Módulo de Young [MPa]
$\bar{x}$	35.10	5,65	33,20	7,47	905,0

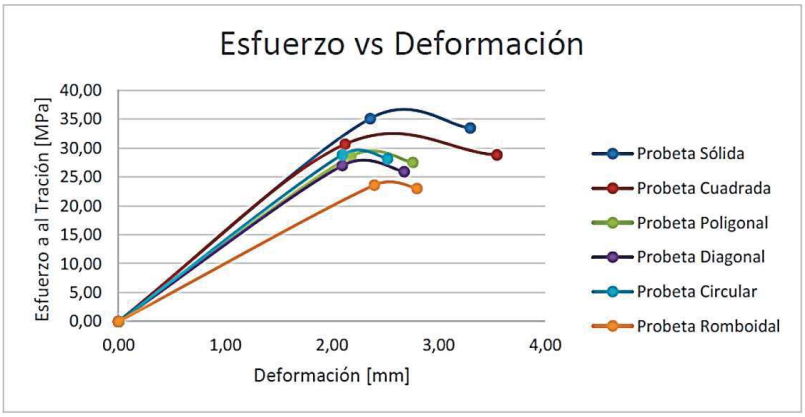
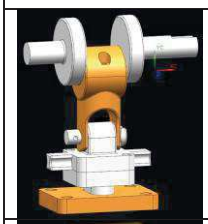
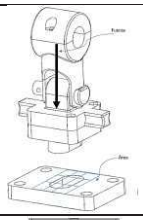
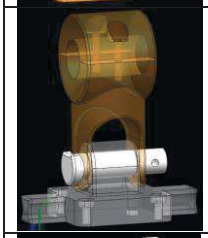
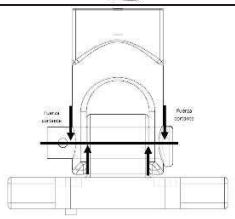
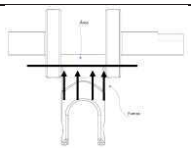
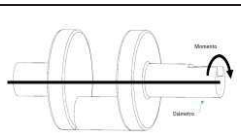


Figura 10.- Curva esfuerzo deformación para el ABS.

La tabla 9, es la consolidación organizada del paquete didáctico concurrente que integra las secuencias instruccionales independientes y la secuencia integradora. Para ello el participante observa en un solo escenario los dispositivos virtuales y sus representaciones por medio de diagramas de cuerpo libre, para posteriormente determinar los datos y variables asociadas en cada formulación analítica a las cuales puede recurrir nuevamente para solventar dudas o reforzar el conocimiento.

Tabla 9.- Recolección de datos y resultados.

Pieza	Diagrama cuerpo libre	Tipo de Esfuerzo	Fuerza	Área	Esfuerzo Analítico	Esfuerzo simulación
		Normal				
		Cortante				
		Aplastamiento				
		Torsión				

4. Conclusiones

Actualmente se cuenta con un paquete didáctico que consiste en una integración a través de las actividades instruccionales (que se diseñaron de manera concurrente a una meta común) de un dispositivo didáctico impreso en 3D, que asocia los conceptos analíticos con los conceptos físicos de la materia de mecánica de sólidos (esfuerzos y deformaciones), en favor de la mejor comprensión de asignaturas consecuentes como el diseño mecánico y los procesos de manufactura.

La experiencia durante su implementación ha llevado tener como retroalimentación los siguientes comentarios de los estudiantes:

"Realmente me parece muy apropiado en caso de que se trate de un reporte, pues le da un amplio panorama al lector de lo que los alumnos pueden aprender con la troqueladora, de hecho considero que es una práctica muy basta para reforzar lo aprendido en la asignatura de Mecánica de sólidos (I y II) de manera didáctica, por lo que pienso que justifica perfectamente la realización de todo este proyecto. Me gusta el formato que tiene este documento, pues cuenta con un apoyo visual con las imágenes, gráficas y tablas, lo que facilita la comprensión del tema".

"En lo personal considero que las prácticas realizadas son de ayuda para centrar los conocimientos teóricos que vemos en las clases, de forma física. Un claro ejemplo es el esfuerzo cortante que aplica el dado en el material que se desea cortar, o también en como el volante de inercia hace la transferencia de esta misma hacia el cigüeñal y los esfuerzos de torsión que este debe soportar para no llegar al punto de ruptura del material. Yo pienso que el aprender estos conceptos es importante para la formación de un ingeniero porque es parte de nuestro trabajo el conocer las características de los materiales para un buen diseño o bien para la identificación de riesgos potenciales en nuestro futuro ambiente laboral ".

Confirmando con ello la aceptación por la academia de la IES involucrada de la buena práctica educativa implementada. Se considera que el objetivo se ha cumplido, ya que ha percepción de los autores se cuenta con un paquete de material didáctico que permite reducir la problemática de bajo rendimiento académico que se presenta en las IES por la baja asociación de los conceptos de esfuerzo y deformación y sus consecuencias si el diseño se plantea como favorable o no favorable.

Referencias

[1] Beer F., Johnston E., Dewolf J y Mazurek D. "*Mecánica de materiales"*, Quinta ed., Mexico D.F.: Mc Graw Hill, 2010.

[2] Gere J. y Goodno B. "*Mecánica de Materiales"*, México D.F.: CENGAGE, 2009.

[3] Goncharov A. *"Engineering Analysis with NX Advanced Simulation*", *Kindle Edition. Siemens,* 2014.

[4] Montenegro S. "*Resistencia de los Materiales El blog "Resistencia de los Materiales" tiene como objeto ofrecer a sus lectores principios y definiciones básicas"* 2012. [En línea]. Available: http://resistenciadelosmaterialeseip445.blogspot.com/2012/10/capitulo-3.html. [Último acceso: 15 03 2019].

[5] BUAP. "*El desarrollo del personal docente en el nivel medio superior, el pregrado y el posgrado",* Puebla: BUAP Dirección de Fomento Editorial, 2014.

[6] Benavides L. "*Hacia nuevos paradigmas en educación"*, Puebla: CIPAE, 1998.

[7] Duarte J. *"Desarrollo de un prototipo didáctico como alternativa pedagógica para la enseñanza del concepto de inducción electromagnética", Pedagógica,* 2007.

[8] García L. *"Situación de la formación docente inicial y en servicio en la república de Cuba",*

UNESCO, 2004.

[9] BUAP. *"Documento de integración, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla"*, Puebla: BUAP 2007.

[10] BUAP *"Estructura curricular, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla",* Puebla: BUAP, 2007.

[11] BUAP. *"Criterios y niveles de dominio de las competencias genéricas de la BUAP",* Puebla: BUAP, 2012.

[12] Comenio J. *"Didáctica magna",* 2014.

[13] Molina O. *"Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi - rígido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes",* Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2016.

[14] Romero G. *"¿Sirven las Políticas y Prácticas de Formación del Profesorado para Mejorar la Educación? Una Respuesta desde el Análisis de la Construcción Social de la Docencia", Archivos Analíticos de Políticas Educativas,* vol. 15, nº 19, 15 Septiembre 2007.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 6, pp.61 - 73, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Optimización de Sistemas de GEEMTA

De Gante García Marcos[1], Candia García Filiberto[2], Ambrosio Lázaro Roberto C[1]., Escamilla Sánchez Juan Carlos[2] y Arizpe Islas Jorge L.[3]

[1]Facultad de Ciencias de la Electrónica, BUAP, México
[2]Facultad de Ingeniería, BUAP, México.
[3]Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, UANL, México.
filinc@hotmail.com

Resumen

Este trabajo se ubica en el área de ingeniería y específicamente en el sector de generación y distribución de energía eléctrica, los antecedentes que orillan la realización del presente proyecto pretenden apoyar los Objetivos para el Desarrollo Sostenible (ODS) en particular el objetivo 7, que busca garantizar el acceso universal a electricidad asequible para 2030. Por lo tanto, el propósito es proponer una alternativa de alta tecnología mediante conversores CA-CC, CC-CC y CC-CA, para optimizar el aprovechamiento de la energía eléctrica suministrada por los sistemas de Sistemas de Generación de Energía Eléctrica Mediante Tecnologías Alternativas (GEEMTA). La metodología es exploratoria-experimental, con base en el método científico-deductivo, los resultados se obtienen en dos procesos: por simulación mediante Simulink y por medición directa en un prototipo funcional, los datos se comparan durante el comportamiento de tres escenarios: a media carga, a carga completa y sobrecarga del 25%. El desarrollo incorpora el concepto de sistemas de GEEMTA. El procedimiento consiste en la manipulación de prototipos didácticos comerciales de bajo costo, los cuales se organizan e integran de acuerdo con la demanda de energía eléctrica de una familia que vive en condiciones de pobreza, en zonas urbanas marginadas sin servicios públicos. Las conclusiones adelantan una pronta adopción del sistema propuesto, ya que actualmente se cuenta con un prototipo funcional que permite regular la carga mediante convertidores CA-CC/CC-CC/CC-CA de sistemas de GEEMTA.

Palabras clave: Sistemas GEEMTA, Convertidores conmutados, Microredes.

1. Introducción

La agenda del Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo [1] busca garantizar el acceso universal a electricidad asequible para 2030, para ello es necesario investigar e invertir en fuentes de energía limpia, como la solar, eólica y termal. Por lo consiguiente, expandir la infraestructura y mejorar la tecnología para contar con energía limpia en todos los países en desarrollo, es un objetivo crucial que puede estimular el crecimiento y a la vez ayudar al medio ambiente [1].

Para garantizar el suministro de energía eléctrica mediante tecnologías alternativas, uno de los principales problemas, es la simulación de sistemas de alimentación distribuida, por la falta de modelos de sus componentes (baterías, protecciones, filtros, convertidores de CC-CC y ACCC, inversores, distintos tipos de cargas, etc.) [2]. Este trabajo de investigación prioriza el desarrollo de modelos comportamentales basados en convertidores de energía. El estudio se realiza por medio de prototipos didácticos comerciales, los cuales se incorporan al concepto de Sistema de Generación de Energía Eléctrica Mediante Tecnologías Alternativas (GEEMTA) [3], bajo la perspectiva de minimizar el riesgo de la salud pública y la ecología [4] a fin de ofrecer ventajas competitivas en el presente y no problemáticas a futuro.

La metodología es exploratoria-experimental, con base en el método científico-deductivo, los resultados se obtienen por medición directa y se comparan contra el comportamiento de tres escenarios: a media carga, a carga completa, sobrecarga del 25%. El desarrollo consiste en la manipulación de prototipos didácticos comerciales de bajo costo, los cuales se organizan e integran de acuerdo con la demanda de abasto de energía eléctrica de una familia que vive en condiciones de pobreza y en zonas urbanas marginadas sin servicios públicos. Los prototipos comerciales son de referencia tecnológica de la electrónica de potencia en específico convertidores de CA-CC, CC-CC y CC-CA. Los resultados muestran comportamientos aceptables y funcionales de carga-descarga de los bancos de baterías (figuras 7 y 8).

Se complementa la actual propuesta de integración con recomendaciones para el manejo adecuado del suministro de la energía eléctrica. Las conclusiones adelantan una pronta adopción del prototipo que busca colaborar en el derecho al acceso universal a una electricidad asequible, para los habitantes de las zonas urbanas marginadas sin servicios públicos.

Para una clara descripción se ha considerado que un sistema hibrido de GEEMTA es un prototipo tecnológico que integra como mínimo los subsistemas eléctrico, mecánico, electrónico y electromecánico, destinados a la producción de energía eléctrica mediante alternativas tecnológicas llamadas verdes. En el reporte de [3] son sistemas que, a partir de un análisis cuantitativo-cualitativo, permiten estimar el grado de desarrollo que un investigador aporta en la innovación de un sistema de GEEMTA y, de esta manera el grado de participación social que se tiene con la comunidad involucrada y con el desarrollo sustentable del país [5] [6]. También estos sistemas de GEEMTA han sido llamados por [7] de manera genérica como Sistemas Híbridos de Generación de Energía Eléctrica (SHGEE) [7].

2. Metodología

La metodología es exploratoria-experimental, con base en el método científico-deductivo, los resultados se obtienen por medición directa y se comparan contra el comportamiento ideal de una simulación virtual en Simulink, para tres escenarios a media carga, a carga completa, sobrecarga del 25%. Posteriormente los resultados se capturan en tablas y analizan de manera comparativa para obtener un porcentaje de desviación entre los valores y datos obtenidos. La figura 1, describe el proceso que se lleva a cabo para el desarrollo de las gráficas de comportamiento del sistema.

El desarrollo se realizó de manera experimental al comparar los datos de salida del inversor que es de150 watts y de la salida de dos Buck converter de 30 watts. La carga teórica se estimó de 180 watts el equivalente en la NOM-001-SEDE-2012 a un contacto monofásico de 110 volts de corriente alterna. La carga real conectada fue de100 watts que consistió en: 1 celular, 2 baterías de emergencia, 1 tira de LED’s de 5 metros, 1 foco incandescente.

Figura 1.- Diagrama secuencial de desarrollo del proyecto.

En esta investigación se desarrolla una configuración propia (figura 2) del Sistema Híbrido de Generación de Energía Eléctrica mediante Tecnologías Alternativas, a partir de la evaluación de las posibles tipologías (figura 3) que se pueden considerar y que han sido estudiadas por [7].

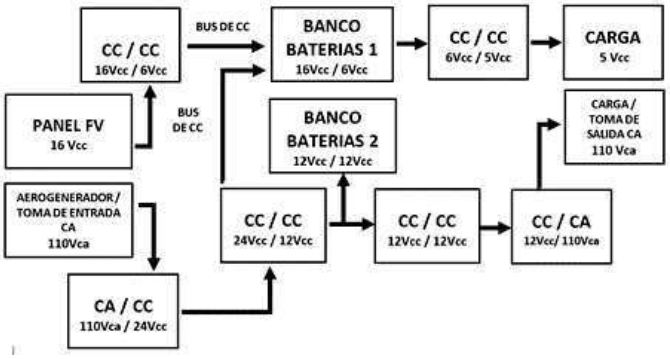


Figura 2.- Tipología propuesta con bus de CC y dos bancos de baterías independientes para la carga. Desarrollo propio.

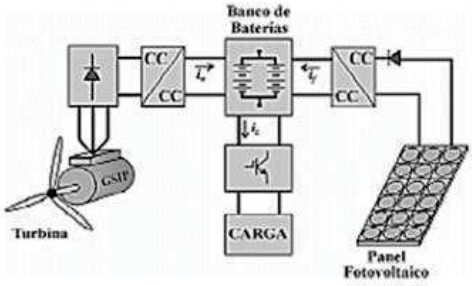


Figura 3.- Estructura General de un SHGEE unidireccional. Tomado de [Valenciaga, 2001].

Otra tipología que se estudio fue la propuesta por [8], quienes propusieron un sistema que se compone de una matriz de 4 por 4 (cuatro columnas en paralelo formadas cada una por cuatro paneles en serie) de paneles fotovoltaicos de silicio monocristalino I-165 de Isofotón, con una potencia total pico de 2,64 kW (bajo condiciones estándar de test) conectado a un banco de baterías mediante un regulador. Se concentro la revisión en la comparación de los sistemas de bus. Se identifico que el bus de AC/DC convencional ofrece ventajas convincentes en comparación con los sistemas de bus

único de CA o CC, ya que se pueden satisfacer las cargas de CA directamente, a diferencia de un sistema de bus de CC [9].

El modelo del sistema de GEEMTA a emplear a partir del estudio realizado por Valenciaga y Delgado, fue un desarrollo propio que se muestra en la figura 2 y de manera física en la figura 4, la cual es unidireccional con bus de CC.

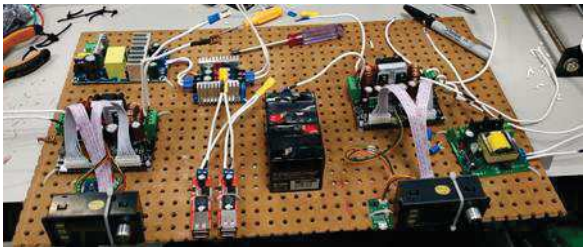


Figura 4.- Tipología propuesta con bus de CC y dos bancos de baterías independientes para la carga. Desarrollo propio.

Se eligió la alimentación principal del dispositivo por fotoceldas, porque uno de los problemas que se plantean en las redes de distribución de corriente alterna es el amortiguamiento de oscilaciones. Esto es, la caída en la frecuencia de operación cuando el consumo de potencia se dispara [10].

Una limitante del proyecto fue la incorporación de una etapa de fuente regulada de CA-CC se proyecta para un posterior suministro de CFE (de acuerdo con el incremento de la infraestructura pública), para incorporar la vivienda aislada a la red de energía eléctrica y evitar cambios en la infraestructura ya existente.

En el diseño actual la etapa del Buck converter permite mantener un voltaje constante de alimentación a un banco de baterías configurable de 6 VCC, con el propósito de mantener la alimentación de manera simple y directa, sin el uso de los llamados cargadores de corriente a los dispositivos y aparatos eléctricos como iluminación, gadgets o celulares, entre otros.

El uso de un Boost converter favorece la conexión de dispositivos eléctricos de medio voltaje por medio de un banco de baterías de 48 VCC configurable, también puede ser utilizado para alimentar dispositivos de mayor potencia como bombas de agua de CC.

En esta etapa de la investigación las características técnicas de la integración para la regulación del suministro y requerimiento eléctrico (voltaje y corriente) están limitados a la funcionalidad y potencia de los prototipos académicos de venta al público a bajo costo. Debido a que los dispositivos de potencias comerciales (de 1 a 5 KW) son de un alto costo. Una característica esencial del dispositivo a desarrollar es la liberación de la patente, para promover en un trabajo posterior el desarrollo de microredes que sean competitivas en la venta de energía eléctrica.

Para incrementar la potencia de salida, se busca evaluar la conexión en paralelo de varios Boost converter, aspecto que en la documentación revisada no es alentadora al respecto. Sin embargo, el desarrollo a realizar en otro trabajo futuro permitirá incrementar cargas de potencias superiores a 10 amperes y menores a 20 amperes puedan ser conectadas y alimentadas por los bancos de baterías cuando sea requerida una demanda extraordinaria.

Asimismo, se considera que el proyecto es viable, ya que promueve como alternativa formar microrredes entre los habitantes de las zonas marginadas. Quienes con apoyo de una legislación local puedan incorporar un ingreso económico adicional para favorecer su economía. Para ello será necesario un centro de gestión de flujos que permita la adecuada organización, control y distribución de la energía. Entre los puntos a legislar se encontrarán las capacidades máximas instaladas y las

demandas máximas, que serán limitadas a la supervivencia y convivencia decentes y dignas de los habitantes de las zonas marginadas sin servicios públicos. Las oportunidades comerciales no serán atendidas en las viviendas para mantener una regularidad y consistencia del diseño autosustentable de la microred.

Se busca cubrir, a través de la implementación colaborativa del dispositivo regulador la falta de una alternativa tecnológica de diseño abierto y pública que permita a grupos o individuos con algún conocimiento técnico implementar sus propias soluciones de acceso al suministro de energía eléctrica. Asimismo, se presenta como una alternativa para las ONGs que buscan hacer llegar una solución energética en sitios aislados, o para quienes quieren obtener un servicio eléctrico económico a partir de fuentes renovables. Se ha considerado ya en otros estudios que a través de una tecnología Open-Source se permite a colectividades locales construir su propia cadena de conversión eléctrica, y también a fabricantes que al adherirse al concepto modular y estándar, puedan proveer alternativas compatibles con esta iniciativa [11].

Considerando que los niveles de tensión y corriente pueden variar significativamente con la demanda de la carga. Se busca en posteriores estudios implementar módulos para incrementar la potencia, y lograr que se inserten en una plataforma estandarizada y cuenten con un módulo central de monitoreo y supervisión configurable. El módulo central será la inteligencia que comunique los módulos estándar (cada uno con su propio controlador de bajo costo) y permita configurar su operación. A través de esto es posible asegurar que una determinada combinación de módulos sirva cada aplicación de micro generación requerida [11].

El prototipo propuesto en primera instancia es un producto que busca adaptarse a diversos sistemas de GEEMTA de baja potencia (1 a 5 KW), ya que el enfoque modular permite sobre una base común combinar distintos módulos de acuerdo con las particularidades de la región y del sistema a energizar. Por lo tanto, el producto final coincidiendo con el trabajo de [11] debe contar con las siguientes características:

- Altamente versátil, para adaptarse a distintas fuentes renovables de energía.
- Costo-eficiente:
  - Módulos genéricos fabricados en serie.
  - Se paga por el producto, no por la marca (código y hardware abierto).
- Compatible con módulos de autoconstrucción
- Mantenimiento menos oneroso: En caso de fallas, se reemplaza un módulo

3. Resultados

Estos se subdividen en dos apartados el teórico mediante un modelo de Simulink y el experimental mediante la interconexión de los componentes comerciales en este caso experimental. Posteriormente con la información obtenida esta se reflexiona en el apartado de discusión.

El modelo utilizado se dividió en dos etapas, la primera es la carga del banco de baterías y la segunda la descarga de este. En la primera etapa se sustituyó el panel solar por una alimentación constante de 12VCC, la cual alimenta un convertidor tipo Buck-Boost, este convertidor tiene la función de regular el voltaje a 6V contantes sin importar la variación en el voltaje proporcionado por el panel fotovoltaico, para así, cargar el banco de baterías de 6V a 2Ah. La alimentación del aerogenerador o la entrada AC de 110VAC se puede ver en la parte inferior en la figura 5 dicha corriente de AC es convertida a CC mediante un convertidor tipo CA-CC cuya salida es fija a 24VCC, posteriormente estos 24VCC se reducen a 12VCC constantes por medio de un convertidor tipo Buck o Step-Down para así, cargar el banco de baterías de 12V a 1Ah.

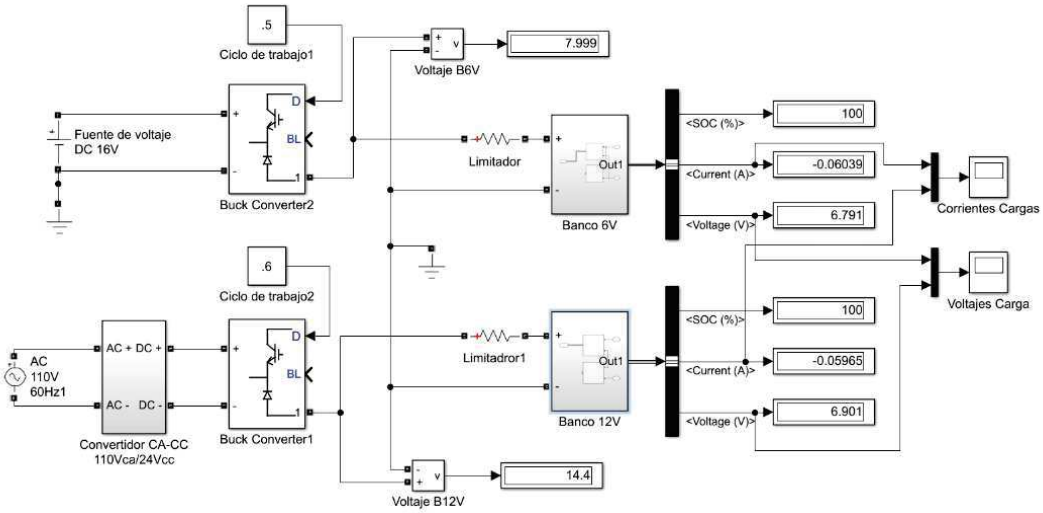


Figura 5.- Modelo del sistema de carga para bancos de baterías de 6V y 12V.

Los bancos de baterías (figura 6) están conformados por dos baterías de 6V a 1Ah en diferentes configuraciones, para el banco denominado “Banco 6V” se encuentran configuradas en paralelo y para el denominado “Banco 12V” se encuentran configuradas en serie.

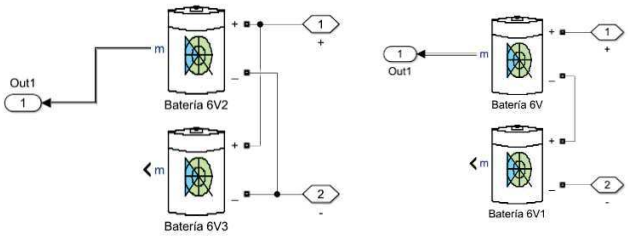


Figura 6.- Baterías en paralelo 6VCC 2A/h y baterías en serie 12VCC 1A/h.

Los convertidores tipo Buck en esta etapa de la simulación se configuraron con un ciclo de trabajo fijo de 45% y de 55% con lo que proporcionan un voltaje de 7.2V y 13.2V con el que se obtiene una corriente estable de entre 0.06A y 0.1A para cargar los bancos de baterías.

3.1 Toma de mediciones de la medición virtual y captura datos.

Para llevar a cabo la medición virtual, se hizo uso del propio sistema de monitoreo del bloque de batería de Simulink, el cuál es un bus de señales de las que se pueden obtenerlos datos más relevantes como voltaje, corriente, estado de carga (SOC) etc., que pueden ser desplegados en un display simple o en un bloque scope.

3.2 Toma de mediciones experimentales y captura de datos.

Para realizar las mediciones correspondientes se usaron diferentes medios y herramientas, incluyendo la propia interfaz de control de los módulos Buck-Boost, multímetro digital, y software de captura y edición de video. Se realizó la prueba de descarga, así como la de carga accionando las salidas de los módulos Buck-Boost por medio de la interfaz USB de estos, teniendo la interfaz abierta en primer plano de la computadora, se grabó mediante un video la pantalla durante todo el transcurso de las pruebas y realizando los tres diferentes escenarios para descarga y el único escenario de carga, siempre verificando las correspondencias de los datos leídos por los módulos y su interfaz con ayuda de un multímetro digital conectado en paralelo con los bancos de baterías y los módulos Buck-

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 6, pp.61 - 73, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Boost. Posteriormente el video se analizó para obtener los puntos en los que el voltaje cambió respecto al tiempo de la propia estampa del video, con ello se lograron construir las curvas de carga y descarga correspondientes a los tres escenarios propuestos. La figura 7 muestra un ejemplo de descarga y la figura 8 un ejemplo de carga.

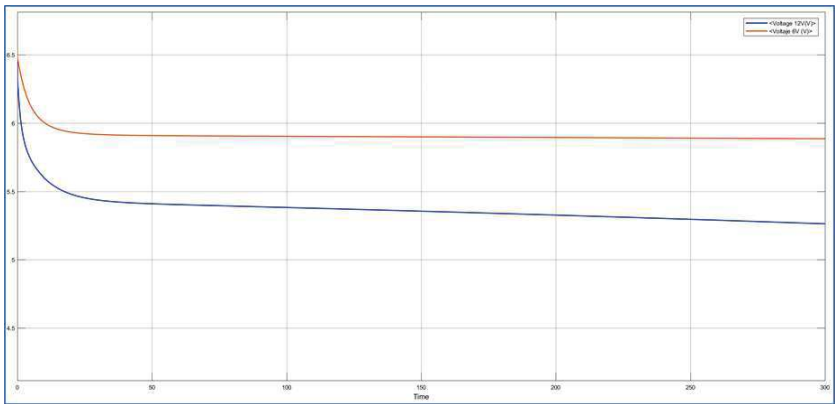


Figura 7.- Curva de voltaje en descarga para ambos bancos de baterías durante 5 minutos, carga de 9W y 32.5W (Media carga).

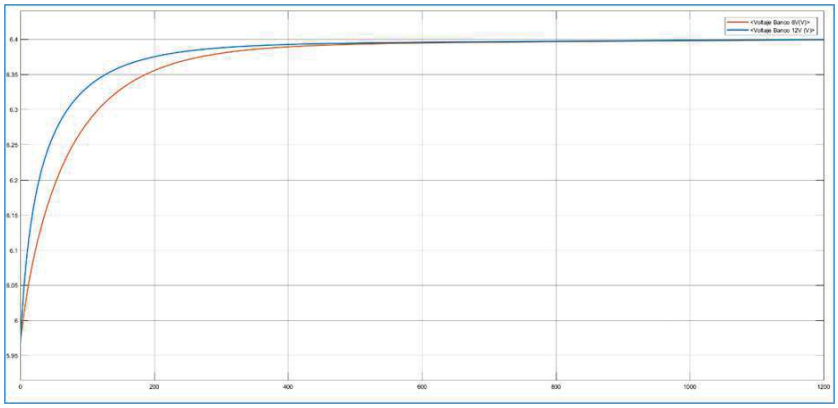


Figura 8.- Curva de voltaje durante la carga de los bancos de baterías por 20 minutos.

Tabla 1.- Comparativa voltajes de carga y descarga de simulación, experimentación y de fábrica.

	Curva de carga				Curva de descarga			
	Simulación	Experimentación	Fabricante	Variación de voltaje con respecto a datos del fabricante (tiempo constante)	Simulación	Experimentación	Fabricante	Variación con respecto a datos del fabricante
Media carga	-	-	-	Sim:- Exp: -	5.26V 5.88V	5.14V 5.80V	6.25V 6.2V	Sim:0.99V/0.32V Exp:1.11/0.4V
Carga nominal	6.4V 6.39V	6.37V 6.4V	6.53V 6.53V	Sim: 0.13V/0.14V Exp: 0.16V/0.13V	4.38V 5.62V	4.25V 5.73V	6.1V 6.2V	Sim:1.72V/0.58V Exp:1.85V/0.47V
Sobre carga	-	-	-	Sim:- Exp: -	3.96V 5.49V	3.26V 5.52V	5.9V 6.1V	Sim:1.94V/0.61V Exp:2.64V/0.58V

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 6, pp.61 - 73, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

4. Discusión

Al graficar las curvas de la simulación en tres escenarios: por debajo de la carga nominal, con carga nominal y con sobrecarga del 25%. Los resultados se han comparado con la curva proporcionada por el fabricante. Determinando que en cuanto al comportamiento de descarga estas son consistentes con la misma ecuación que modela analíticamente el comportamiento de descarga de baterías en Simulink (figura 9).

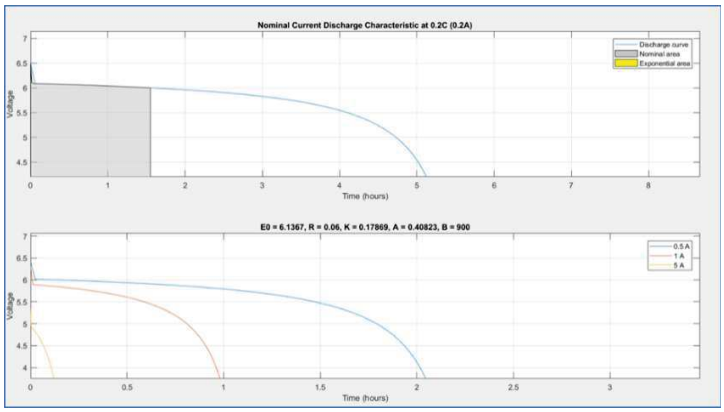


Figura 9.- Curvas del fabricante de descarga (arriba), simulación de curvas de descarga bajo diferentes consumos (abajo).

Las curvas de carga y descarga mostradas anteriormente Simulink las representa a partir del siguiente diagrama de bloques.

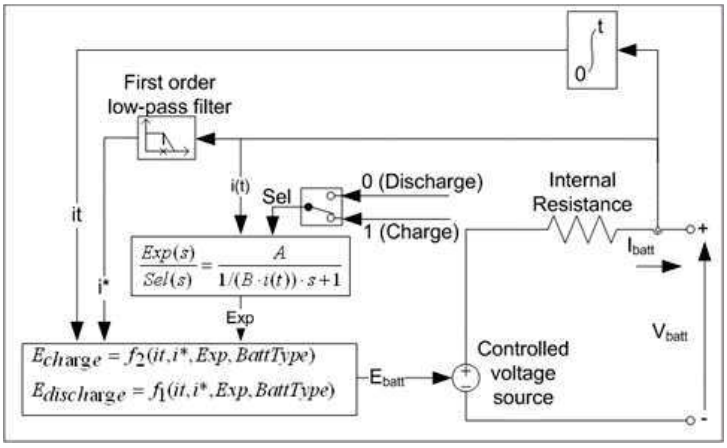


Figura 10.- Diagrama de bloques del modelo genérico de batería de Simulink.

Según el tipo de batería utilizada, Simulink reemplaza las ecuaciones, para el presente trabajo, el tipo de batería es de plomo-ácido cuyas ecuaciones son:

Para descarga:

$$f_1\,(it, i*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + Laplace^{-1}\left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0\right) \qquad (1)$$

Para carga:

$$f_2\,(it, i*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1\cdot Q} \cdot i* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + Laplace^{-1}\left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s}\right) \qquad (2)$$

En estas ecuaciones:

- E_0 es voltaje constante en V
- $Exp(s)$ es la dinámica de la zona exponencial, en V
- $Sel(s)$ representa el modo de batería. Sel(s)=0 durante la descarga, Sel(s)=1 durante la carga.
- K es la polarización constante en V/Ah, o la resistencia de polarización en Ohms
- $i*$ es la dinámica de la corriente de baja frecuencia en A
- i es la corriente en A
- it es la capacidad extraída, en Ah
- Q es la capacidad mázimade la batería en Ah

Después de analizar las respuestas del sistema en las diferentes condiciones dadas tanto por medio de simulación como al realizarlas físicamente, se decidió realizar modificaciones y ajustes al diseño del sistema, integrando en un solo modelo de Simulink los sistemas tanto de carga como de descarga, así como su control vía función lógica. Así mismo se logró reducir el número de convertidores conmutados a solo dos, ambos convertidores tipo buck-boost.

Para la alimentación de entrada se realizaron dos configuraciones, la primera, con una fuente de alimentación de CC constante a 48Vcc, la cual simula el panel fotovoltaico, pero sin presentar las variaciones propias del mismo. En la segunda configuración se utilizó un panel fotovoltaico de 350W que puede proveer entre 25Vcc y 52Vcc dependiendo de las condiciones del Sol, así como de la carga del sistema. La batería es una sola celda de 24Vcc a 10Ah, lo que es una celda de un banco de baterías comercial para estas aplicaciones.

El control está basado en una función con operadores lógicos, la cual monitorea constantemente el estado de carga (SOC) de la batería, el sistema por defecto se encuentra en modo de descarga, con los switches 3 y 4 activados y 1 y 2 apagados, al encontrarse en un estado de descarga y llegar el SOC a 20% o menos, el control activa los switches 1 y 2 al tiempo que desactiva los switches 3 y 4 poniendo al sistema en un estado de carga.

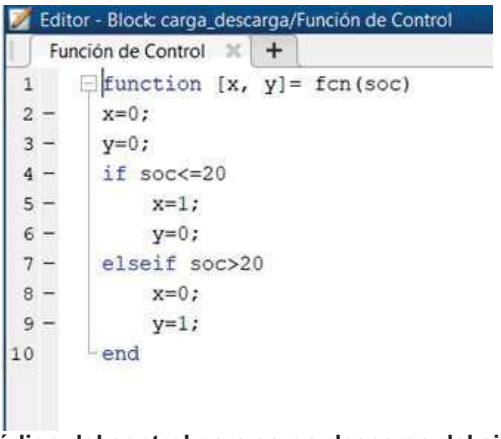


Figura 11.- Código del control para carga-descarga del sistema

La carga o consumo requerido al sistema está modelado por una fuente de corriente predefinida a 8A que es una carga promedio en tareas como cargar un dispositivo celular o alimentar un sistema de entretenimiento. Los convertidores Buck-Boost son los mismos utilizados en el modelo original, son bidireccionales como se mostró en la figura 12, y tienen la función de ajustar el voltaje de carga o descarga según se requiera. Cabe destacar que no se realizó en este modelo revisado la integración del convertidor inversor CC-AC ni el rectificador AC-CC debido a las limitaciones de la simulación, pero serán agregados en futuros desarrollos.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 6, pp.61 - 73, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

A continuación, se puede observar el modelo en Simulink con los ajustes hechos, así como los comportamientos de ambos modelos.

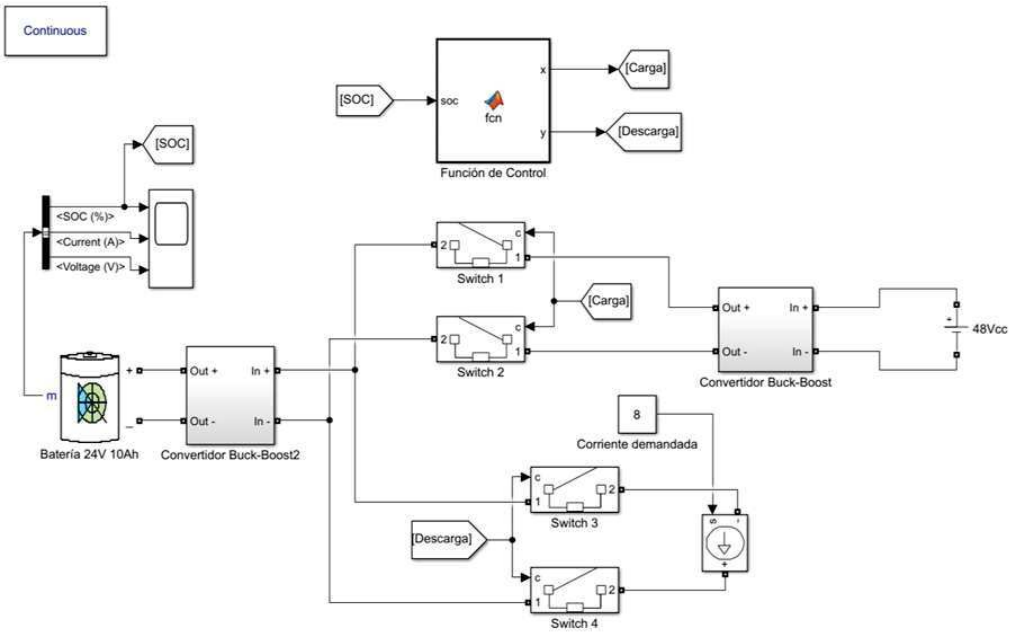


Figura 12.- Modelo del sistema con alimentación constante.

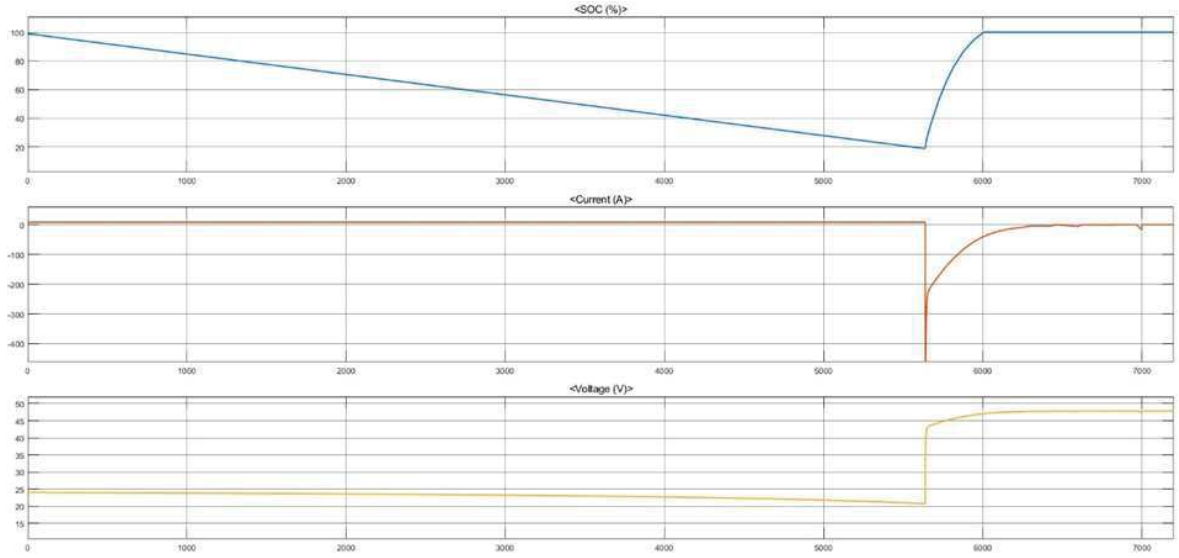


Figura 13.- Respuesta del sistema con alimentación constante.

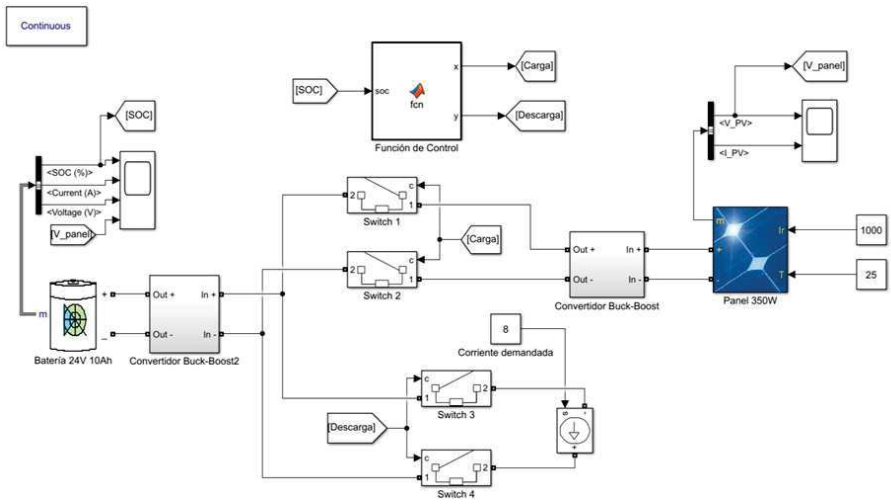


Figura 14.- Modelo del sistema con panel fotovoltaico.

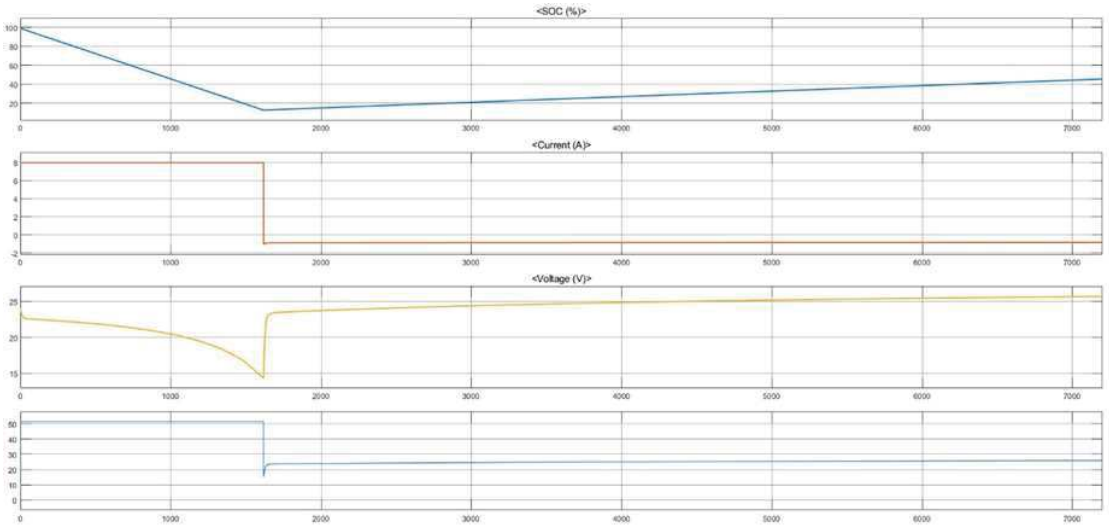


Figura 15.- Respuesta del sistema con panel fotovoltaico.

Se puede observar que, para ambos modelos, las respuestas son similares tanto en voltaje como corriente proporcionado por la batería, sin embargo, la mayor diferencia es en el estado de carga. El modelo con la fuente de voltaje constante no se ve afectada por las variaciones de corriente que es demandada por el sistema tanto en funcionamiento normal como en la transición de carga a descarga, por esta razón la respuesta del estado de carga es mucho más rápida, también notamos que la transición de corriente de la batería tiene un cambio muy brusco de entrega por demanda.

Por otro lado, en el modelo con el panel fotovoltaico, el voltaje sí se ve afectado por las variaciones de corriente, se puede ver cómo al llegar la transición de descarga-carga, el voltaje del panel cae debido a la demanda de corriente que debe entregar, lo cual hace que la carga de la batería se lleve a cabo de una forma más lenta. Este comportamiento es el que más se asemeja a un escenario real, siempre que no se olvide que el panel solar está idealizado tanto en eficiencia como en condiciones de operación.

4.1 Recomendaciones y ajustes de integración

A partir de los resultados obtenidos es posible considerar que las familias que viven en las zonas urbanas marginadas sin servicios puedan acceder al uso de la energía eléctrica, bajo una adaptación cultural en su convivencia familiar.

1. Uso principal de la fotocelda como elemento de alimentación de un sistema de GEEMTA.
2. Uso alternativo de un aerogenerador monofásico como elemento secundario de generación de energía eléctrica.
3. Mantenimiento y vigilancia a los bancos de baterías.
4. Iluminación por LED en toda la casa habitación.
5. Limitar el servicio eléctrico a los dormitorios solo a la iluminación por LED.
6. Convivir alrededor de un centro de carga principal (kiosko), para la alimentación de dispositivos que trabajan directamente en CC, como celulares, laptops, tabletas y pantallas de TV.
7. Limitar el uso de la energía de CA a los dispositivos de cocina y lavado indispensables.
8. Excluir el uso de refrigerador y calefacción.
9. Exclusión de contactos de CA.
10. Prohibir el uso de extensiones para centros de entretenimiento.

El dispositivo regulador no incluye el cálculo de perdidas eléctricas por caída de tensión, ya que se consideran distancias mínimas de instalación y distribución.

5. Conclusiones

Al estudiar los prototipos comerciales de convertidores de CA-CC, CC-CC y CC-CA, se integró un dispositivo distribuidor-regulador de energía eléctrica de alta tecnología para optimizar el aprovechamiento de la energía eléctrica suministrada por los sistemas de GEEMTA, que mantiene un adecuado control del consumo de la energía eléctrica, generada por celdas fotovoltaicas. Por lo cual es posible poner al alcance de los habitantes de las zonas urbanas marginadas de la Ciudad de Puebla el acceso a la energía eléctrica, mediante la inducción de un cambio cultural en la convivencia familiar

Referencias

[1] ONU, *"Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo"*, 2018. [En línea]. Available: http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-4-quality-education.html. [Último acceso: 28 08 2018].

[2] Oliver J., "M*odelado comportamental de convertidores cc-cc para el análisis y simulación de sistemas distribuidos de potencia",* Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2007.

[3] Candia F.y Galindo V., *"Sistemas híbridos de generación de energía eléctrica"*, Titulación en IES, *PCTI,* pp. 1-1, 2012.

[4] Candia F., Carmona J. y Landa C., *"La salud pública un indicador para validar la viabilidad de las tecnologías alternativas"*, *Ingeniería y Tecnología,* pp. 63-67, 2014.

[5] Candia F, y Galindo V., *"La contaminación por silicio una proyección negativa del uso de tecnologías alternativas"*, de *2° Congreso de Tecnología*, México DF, 2012.

[6] Adame M., Candia F. y. Galindo V., *"Interconexión de Sistemas de GEEMTA de Hasta 5 Kw a la Red de CFE"*, de *2° Congreso de Tecnología*, México DF, 2012.

[7] Valenciaga F., "*Control de Estructura Variable en Sistemas Hibridos de Generación de Energía",* La Plata: Universidad Nacional de la Plata, 2001.

[8] Delgado R., Monge B. y Farrerons B., *"Sistema Autónomo de Generación de Energía Renovable"*, de *XIX Jornades de Conferències d'Enginyeria Electrònica del Campus de Terrassa*, 2006.

[9] Ross M., Turcotte D., Roussin S. y Fry A., *"Comparison of AC, DC, AND AC/DC Bus configurations for pv hybrid systems"*. de *SESCI 2005 Conference*, Burnaby, British Columbia, Canada, 2004.

[10] Ausín A., *"Convertidores cc/cc en la interconexión de sistemas de almacenamiento energético con sistemas de generación eólicA",* Alcala de Henares: UAH, 2016.

[11] Alinei J., Oliva R., Lavado L., Corica J., Kahn R. y Little M., *"Proyecto de convertidores modulares de electronica de potencia para energias renovables"*, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente,* pp. 08.115-08.125, 2016.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 7, pp.74 - 86, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Algoritmo Denavit-Hartenberg Aplicado en el Control de un Brazo Robot mediante Leap Motion y LabVIEW

Ricaud Gallegos Rogelio Eduardo y Malagón Soldara Salvador Manuel

Tecnológico Nacional de México en Celaya.
rogelio.eduardo.ricaud@gmail.com

Resumen

El objetivo de esta investigación es crear un brazo robot de tres grados de libertad y un actuador, controlándolos con Leap Motion, mediante la adaptación de las ecuaciones de cinemática inversa resultantes del algoritmo Denavit-Hartenberg. Este proyecto está orientado a permitir que cualquiera use la tecnología de rastreo de movimiento para establecer una comunicación efectiva con un brazo poliarticulado. El movimiento del robot se realiza mediante servomotores. El software de programación es LabVIEW con un ATMEGA 328 montado en un Arduino UNO R3 para adquisición de datos. Por último, los resultados prueban que es posible mover un brazo robot usando los movimientos de la mano y sugiere que el rastreo de movimiento es adecuado para una aplicación electromecánica.

Palabras clave: Cinemática inversa, LabVIEW, Leap Motion, Robot polar.

1. Introducción

La forma en la que avanza la tecnología en el ámbito de control de máquinas es cada vez más amplia, esto debido a nuevas tendencias, como la industria 4.0, el internet de las cosas, la realidad virtual y la personalización de los productos. Todo esto ha surgido como una mejora para que las empresas puedan satisfacer las necesidades de los clientes. Esto es un cambio que se ha comportado de manera gradual e involucra al sector educativo, para brindarle las herramientas a quienes las necesitan en el ambiente industrial.

La aplicación de interés en este documento es el controlador Leap Motion, software que posee un modelo esquelético precargado de la mano humana y puede detectar el movimiento de las manos y dedos. Usa un sistema de tres ejes, “X” para la longitud, “Y” para la altura y “Z” para la profundidad. Posee también dos cámaras digitales pequeñas que hacen capturas de hasta 200 recuadros por segundo y sus dimensiones son de 80 x 30 x 11.25 milímetros, como se ve en la figura 1.

El software del controlador de Leap Motion puede ser instalado en los tres sistemas operativos más conocidos como son: Windows, Mac y Linux. Se basa en una interfaz de programación de aplicaciones (API, por sus siglas en inglés), con la que se puede acceder a los datos que el controlador recoge y para poder procesar la información del movimiento que obtiene se usa el software LabVIEW 2014 de 64 bits, desarrollado por National Instruments, al igual que el instalador de paqueterías VIPM, que incluye un apartado creado por la comunidad llamada Makerhub y que es específico para el controlador Leap Motion, así como el correspondiente para la interfaz de Arduino. A ambos se puede acceder desde la paleta de funciones del diagrama de bloques en el instrumento virtual.

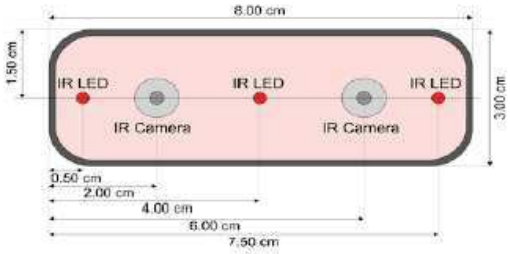


Figura 1. Medidas del controlador.

Los motores que se utilizan son servomotores Tower Pro MG 996R y MG 995 para los tres grados de libertad, de los cuales son dos rotativos y el tercero de tipo prismático. Estos tienen un torque de 8.5 Kg*cm al estar conectados a una fuente de tensión de 5 V y desarrolla una velocidad de 60° cada 0.2 segundos, además de tener engranes de cobre. Para poder interpretar las coordenadas del controlador, éstos se deben convertir al sistema coordenado del robot. Al ejecutar el modo de visualización de diagnóstico de Leap Motion en el ordenador y colocar la mano sobre el dispositivo, se presentan rotaciones de cabeceo, guiñada y alabeo de esta, y corresponden a los ejes “X”, “Y” y “Z” los cuales se transformarán en “-y”, “z” y “-x” para el sistema de origen del robot. El robot se muestra en la figura 2.

Figura 2. Robot construido.

El mayor interés de la investigación es sentar las bases para llevar el control de un robot a mayor escala, como lo es uno de tipo industrial, sosteniendo la importancia de la recolección de resultados que proporcionen información correspondiente a una secuencia de movimientos, de gran utilidad para generar bases de datos acerca de los procesos de manufactura a los que los robot

manipuladores están sometidos, y que luego serán interpretados para formar parte del nuevo enfoque que la industria 4.0, específicamente, el internet de las cosas.

2. Metodología

2.1 Cambio de coordenadas al sistema de origen del robot

El espacio de trabajo máximo que el brazo robot puede alcanzar debido a sus dimensiones es, 405 mm de altura en "z" y 230 mm en los ejes "x" y "y". Los valores máximos en los que la mano se posiciona sin perder la lectura de datos por encima del controlador son, 600 mm en "Y", 250 mm en "±Z" y 200 mm en "±X". Para hacer la conversión se tienen las ecuaciones:

$$z = {(Y * 405)}/{600} \tag{1}$$

$$x = {(Z * 230)}/{-250} \tag{2}$$

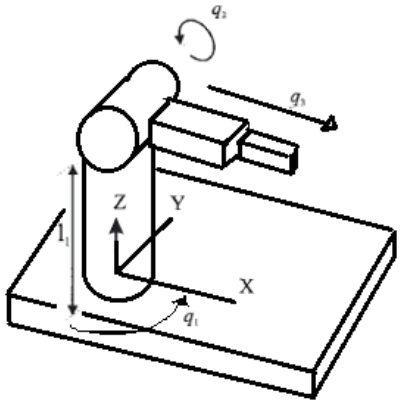
$$y = {(X * 230)}/{-200} \tag{3}$$

2.2 Método de cinemática inversa

Una vez hecho se procede a desarrollar el algoritmo Denavit-Hartenberg, propuesto en base a un método matricial que permite establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas ligado a cada eslabón de una cadena articulada y con el cual se hacen cuatro transformaciones básicas que dependen de las características geométricas de los eslabones:

1. Rotación alrededor del eje z anterior, un ángulo θ
2. Traslación a lo largo de z anterior, una distancia d
3. Traslación a lo largo de x actual, una distancia a
4. Rotación alrededor del eje x actual, un ángulo α

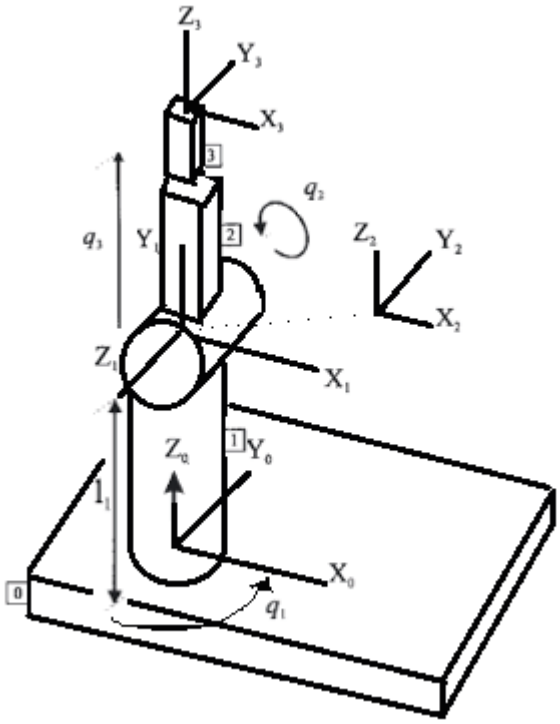
Para un robot que debe posicionar su efector final, hay coordenadas articulares q=$\{q_1, q_2, \ldots, q_n\}$ y los valores que corresponden a dichas variables pueden ser hallados si sólo se consideran los primeros tres grados de libertad. Es adecuado usar este tipo de análisis puesto que el robot polar usado queda contenido en un plano determinado por el ángulo de la variable q_1. Las transformaciones básicas se llevan a cabo con base en la configuración del robot, que como lo establece Antonio Barrientos [1], es dibujado apuntando en la dirección hacia la cual el robot es



construido y corresponde al que se muestra en la figura 3.

Figura 3. Estructura de análisis para el robot.

Debido a que la posición del robot es más adecuada si los ejes de cada articulación que rota o



se desplaza son colocados en la configuración de la figura 4, se procede a analizarlo totalmente vertical.

Figura 4. Posición usada para análisis del robot.

Sobre estos sistemas de rotaciones y traslaciones se establecen los pasos para la creación de la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros Denavit-Hartenberg.

Articulación	θ	d	a	α
1	q_1	l_1	0	90
2	q_2	0	0	-90
3	0	q_3	0	0

Con esos valores se generan las matrices de transformación homogénea que representan la posición y orientación relativa entre sistemas de eslabones consecutivos pertenecientes al robot. Cabe destacar que las letras S y C representan la aplicación de las funciones trigonométricas seno y coseno sobre el ángulo theta.

$$ {}^{1}_{0}A = \begin{bmatrix} C1 & 0 & S1 & 0 \\ S1 & 0 & -C1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^{2}_{1}A = \begin{bmatrix} C2 & 0 & -S2 & 0 \\ S2 & 0 & C2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^{3}_{2}A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4} $$

La composición de las matrices homogéneas da como resultado un conjunto de rotaciones y traslaciones y está definida como se indica en la ecuación 5.

$$ {}^{3}_{0}T = \begin{bmatrix} nx & ox & ax & px \\ ny & oy & ay & py \\ nz & oz & az & pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5} $$

De igual manera se obtiene la matriz inversa de los eslabones 1 y 2.

$$ {}^{1}_{0}A^{-1} = \begin{bmatrix} C1 & S1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l1 \\ S1 & -C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^{2}_{1}A^{-1} = \begin{bmatrix} C2 & S2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -S2 & C2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6} $$

Para obtener la expresión del ángulo q_1, éste se debe despejar del resto de las variables articulares, utilizando la ecuación 7.

$$ ({}^{1}_{0}A)^{-1} * {}^{3}_{0}T = {}^{2}_{1}A * {}^{3}_{2}A \tag{7} $$

$$ \begin{bmatrix} C1 & S1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l1 \\ S1 & -C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} nx & ox & ax & px \\ ny & oy & ay & py \\ nz & oz & az & pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C2 & 0 & -S2 & -S2q3 \\ S2 & 0 & C2 & C2q3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8} $$

De aquí se toma el tercer renglón multiplicado por la cuarta columna para dar como resultado la ecuación 9.

$$ S1 * px - C1 * py = 0 \tag{9} $$

Y se obtiene la variable articular q_1.

$$ q_1 = arc\tan({}^{py}/_{px}) \tag{10} $$

Para obtener la segunda expresión se utilizará la ecuación 11.

$$({}^{1}_{0}A)^{-1} * ({}^{2}_{1}A)^{-1} * {}^{3}_{0}T = {}^{3}_{2}A \tag{11}$$

$$\begin{bmatrix} C2C1 & C2S1 & S2 & -l1S2 \\ -S1 & C1 & 0 & 0 \\ -S2C1 & -S2S1 & C2 & -C2l1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} nx & ox & ax & px \\ ny & oy & ay & py \\ nz & oz & az & pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

De donde se toma el primer renglón multiplicado por la cuarta columna para dar lugar a la ecuación 13.

$$C2C1 * px + C2S1 * py + S2 * pz - l1 * S2 = 0 \tag{13}$$

De donde se obtiene la variable articular q_2.

$$q_2 = arc\tan\left(\sqrt{px^2 + py^2} \Big/ (pz - l1)\right) \tag{14}$$

Si ahora se toma el tercer renglón multiplicado por la cuarta columna se obtiene la ecuación 15.

$$-S2C1 * px - S2S1 * py + C2 * pz - l1 * C2 = q_3 \tag{15}$$

Y se obtiene la variable articular prismática q_3.

$$q_3 = C2(pz - l1) - S2\sqrt{px^2 + py^2} \tag{16}$$

2.3 Creación de los archivos de acceso al controlador

Se hace uso del equipo de desarrollo de software de Leap Motion, del cual se copian los archivos de librería de enlace dinámico, con extensión dll y que llevan por nombre Leap, LeapCSharp, LeapCSharp.NET4.0, así como copiar el archivo LeapCSharp.ctl, a la carpeta de elaboración de proyecto.

Entonces se crea un proyecto de LabVIEW, en donde se abre un nuevo instrumento virtual (VI). Dentro de éste, se crea una referencia por medio de un archivo con extensión NET, para acceder a los movimientos de la mano. Una vez hecho, este archivo debe guardarse y en un nuevo VI se inserta como un subVI. El instrumento virtual de apertura se muestra en la figura 5, en donde se crea un ciclo de casos para que al no haber errores de conexión, la recolección de datos ocurra de manera continua desde el objeto del controlador que se encarga de mandar la información de manera continua.

Es importante que los archivos estén completos al descargar el equipo de desarrollo de software de Leap Motion, puesto que estos generan una lectura continua de los recuadros que el controlador captura mientras esté conectado y haya creado un “objeto mano” del cual pueda extraer información.

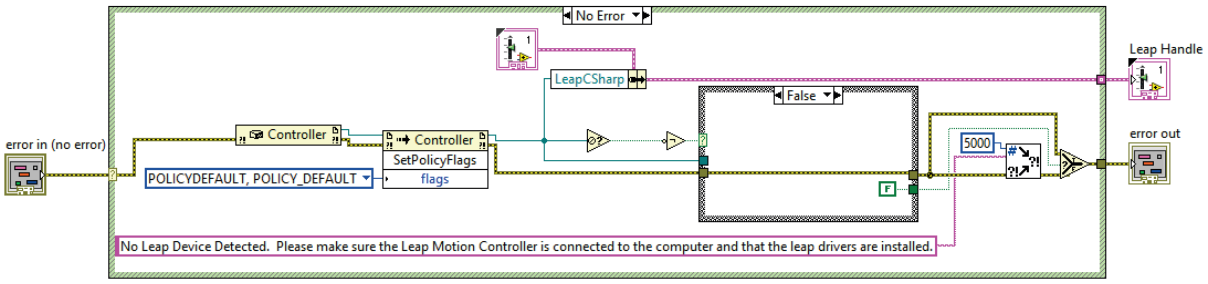


Figura 5. Instrumento virtual de apertura de Leap Motion.

2.4 Creación del instrumento virtual

Para la estructura del VI principal se debe de crear un ciclo while, que estará monitoreando los datos que el controlador provee, y del cual se toman los valores mediante los bloques de programación de Leap Motion, estos son:

1. *Open*. Permite abrir una conexión al controlador con la opción de tener gestos habilitados.
2. *Read All Data*. Solicita y analiza un recuadro de datos del controlador. Todos los datos asociados con el recuadro se organizan en un cluster de LabVIEW para acceso.
3. *Read 1 Hand Position Velocity*. Lee posición y velocidad de una mano en el recuadro.
4. *Close*. Cierra la conexión al controlador.

De igual manera se deben de añadir bloques de comunicación con Arduino, los cuales son:

1. *Init*. Inicializa la conexión a un arduino.
2. *Set number of servos*. Crea espacio en la memoria para el número de servomotores especificado.
3. *Configure servo*. Asigna un puerto digital de salida.
4. *Servo write angle*. Coloca el servo especificado al ángulo especificado en grados.
5. *Close*. Cierra la conexión con el arduino.

El instrumento virtual consta de 6 partes principales:

1. *Apertura*. Se colocan los bloques de inicio a Leap y Arduino así como colocar número de servos y configurar servo.
2. *Transformar coordenadas*. Se programan las ecuaciones 1, 2 y 3 para cambiar las coordenadas del controlador a las del robot.
3. *Algoritmo Denavit-Hartenberg*. Se programan las ecuaciones 10, 14 y 16 para obtener los valores en radianes de los ángulos que resultan de la cinemática inversa.
4. *Convertir ángulos*. Se usa la función de la línea recta para limitar el espacio de trabajo del robot y convertir el ángulo a valores degesimales.
5. *Enviar valores a los servomotores*. Una vez transformado el ángulo se envía a los bloques de escritura de Arduino para posicionar a los servomotores al ángulo comandado. Cuando el valor del radio que crea la mano sobre el controlador disminuye de 58 milímetros, el gripper que estará posicionado como efector final se cerrará, y sostendrá un objeto.
6. *Cierre*. Se colocan los bloques de cierre tanto de Leap y de Arduino.

Para generar la activación del efector final, constituido por un gripper comercial de dos puntas, se debe de acceder al bloque “Read All Data”, y extraer el valor del radio esférico de la mano. Por medio de éste se podrá hacer una comparación y provocar la activación y cierre del gripper cuando el usuario cierre su mano. Una vez que se vuelve a abrir, el gripper es llevado a la posición de cero grados para permitir hacer la sujeción nuevamente. El instrumento virtual terminado, se presenta en la figura 6.

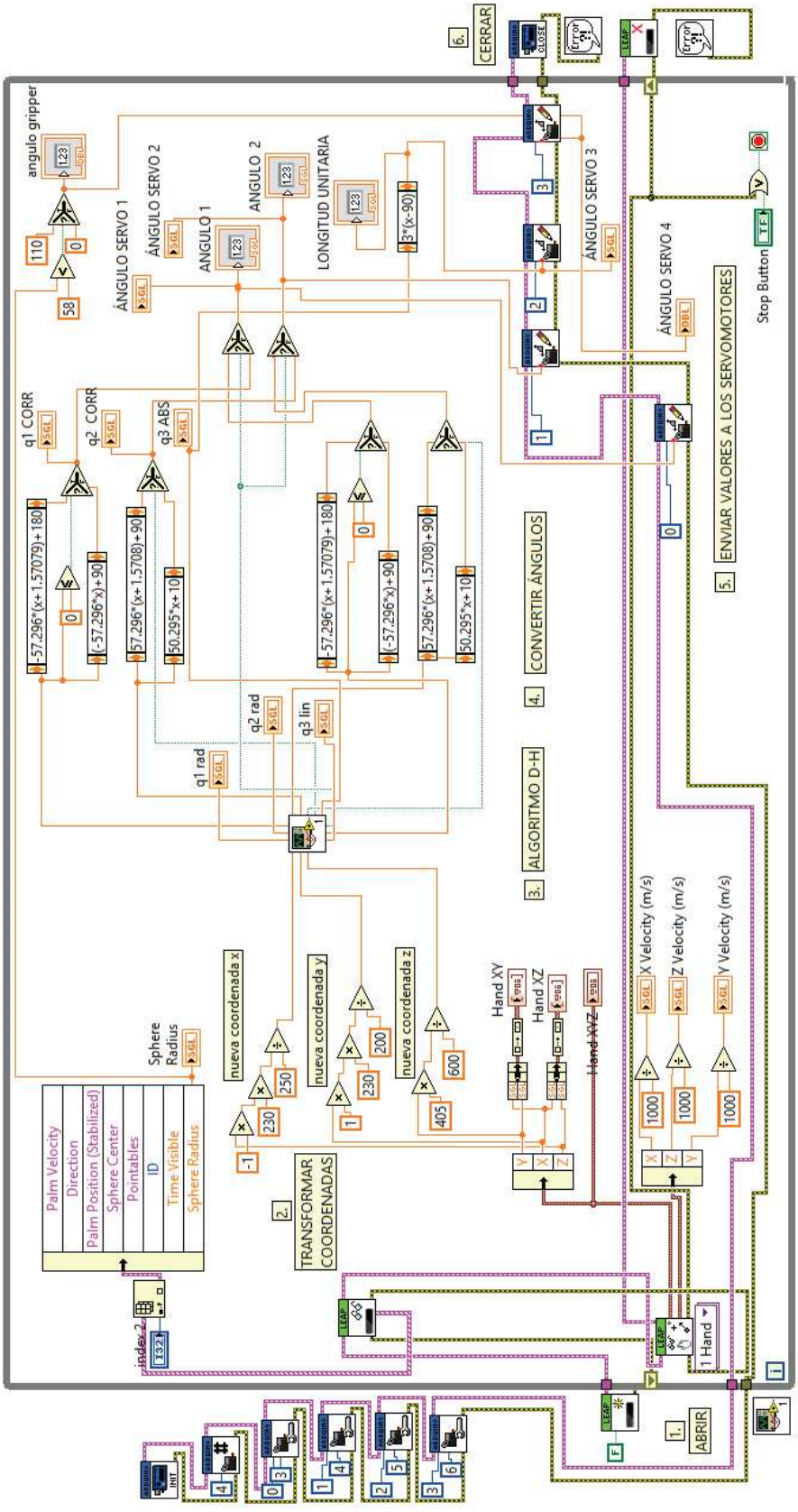


Figura 6. Diagrama de bloques del instrumento virtual.

Para las ecuaciones del algoritmo Denavit-Hartenberg se creó un SubVI que permite reducir el espacio ocupado y evitar tener bloques de programación demasiado cercanos entre ellos.

3. Resultados

Al hacer las conexiones entre el ordenador con LabVIEW 2014, el Arduino y Leap Motion, así como conectar los servomotores a los pines digitales asignados en el VI, y ejecutar el instrumento virtual, los servomotores son llevados a una posición inicial en la que los ángulos toman los valores de la tabla 2.

Tabla 2. Valores por defecto de los servomotores.

Servo	θ
1	90
2	90
3	0
4	0

Cuando la mano se posiciona sobre el controlador, el robot recibe los valores calculados por el algoritmo y es llevado hasta la posición equivalente de las coordenadas transformadas. Las posiciones sin sujetar un objeto así como las posiciones cuando es tomado por el gripper se muestran en las figuras 7 y 8, respectivamente.

Si el usuario quita su mano del rango efectivo de lectura del controlador, o se posiciona en el eje negativo de “x”, los bloques de ecuación mostrados en el diagrama no son leídos; en su lugar, un valor correspondiente al ángulo mostrado en la tabla 2 es enviado para garantizar que el robot funcione en el espacio programado.

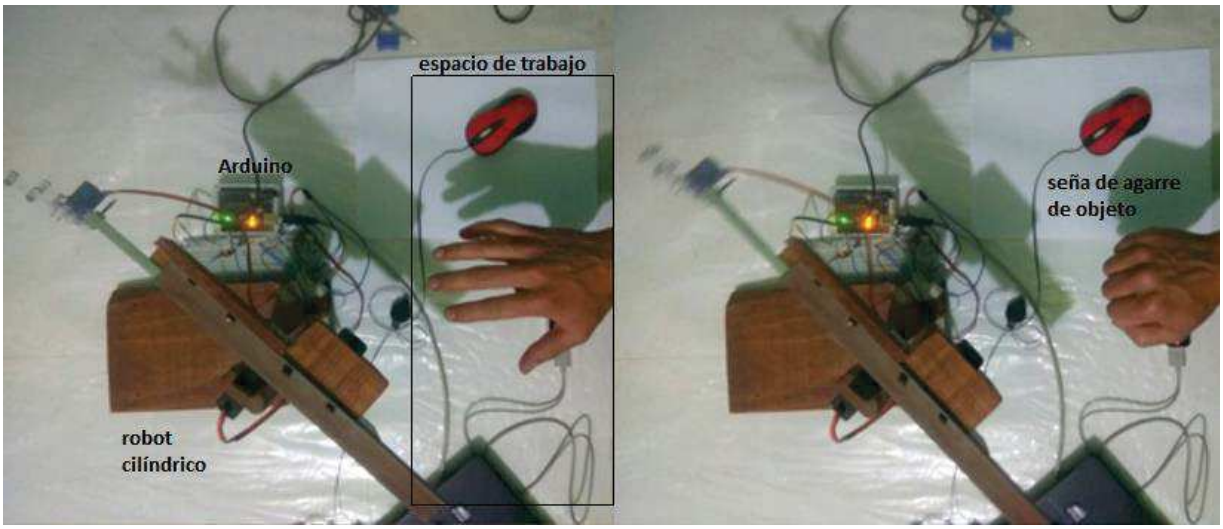


Figura 7. Accionamiento gripper.

La respuesta del robot a las señales leídas por el controlador es continua, mientras que el instrumento virtual no detecte problemas tanto del Leap como Arduino. Esto puede ocurrir de tres maneras:

1. El usuario desconecta el controlador del puerto USB de su computadora.
2. El software de controlador detecta una disminución de la corriente proveniente del puerto USB y envía un mensaje de pérdida del rendimiento, provocando la suspensión de las señales comandadas a los servomotores, hasta que se realice una comprobación en el visualizador del Leap Motion y se reanude el rastreo de movimiento.
3. El usuario desconecta el Arduino del puerto USB de su computadora, provocando un mensaje de error proveniente del bloque de apertura del diagrama de bloques, que requiere reconectar el dispositivo, detener el instrumento virtual y ejecutarlo nuevamente.

Cuando la mano se desplaza una cantidad mayor a 135 mm desde el origen del sistema coordenado del controlador, el elemento prismático q_3 lo hace de manera similar hasta alcanzar la longitud máxima que es de 230 mm, y aunque la mano avance más, ese valor se mantiene, pues el espacio de trabajo ha sido limitado para crear correspondencia entre los sistemas.

Se colocó un objeto regular para ser sostenido por el gripper. El ángulo para cerrarlo es de 110 grados, y crea la presión suficiente para que éste no caiga pese a la velocidad de rotación de la articulación del servomotor número 2.

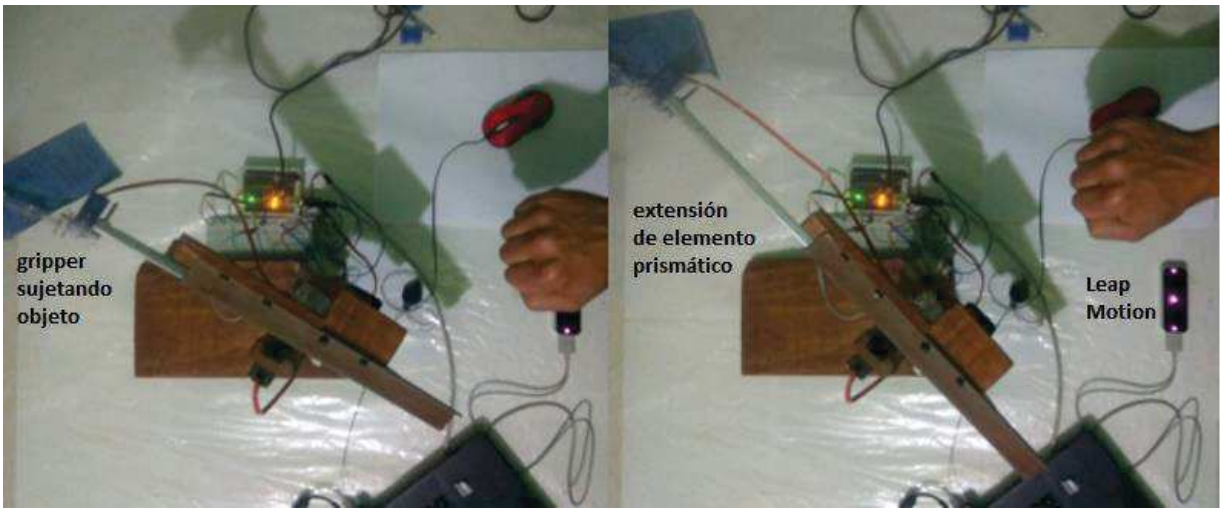


Figura 8. Movimiento de un objeto sujeto por el gripper.

Ahora, cuando se llevó a cabo un ciclo de movimiento partiendo desde 180 hasta cero grados del servo 1 y de regreso, los valores fueron registrados en un gráfico XY del panel frontal de LabVIEW para cada servomotor. Estos valores fueron exportados a un documento de Microsoft Office Excel para obtener un registro de las posiciones que el robot obtiene para cada uno de los motores durante el funcionamiento hasta que el instrumento virtual se detiene.

Las gráficas que fueron exportadas directamente como imagen se muestran en la figura 9.

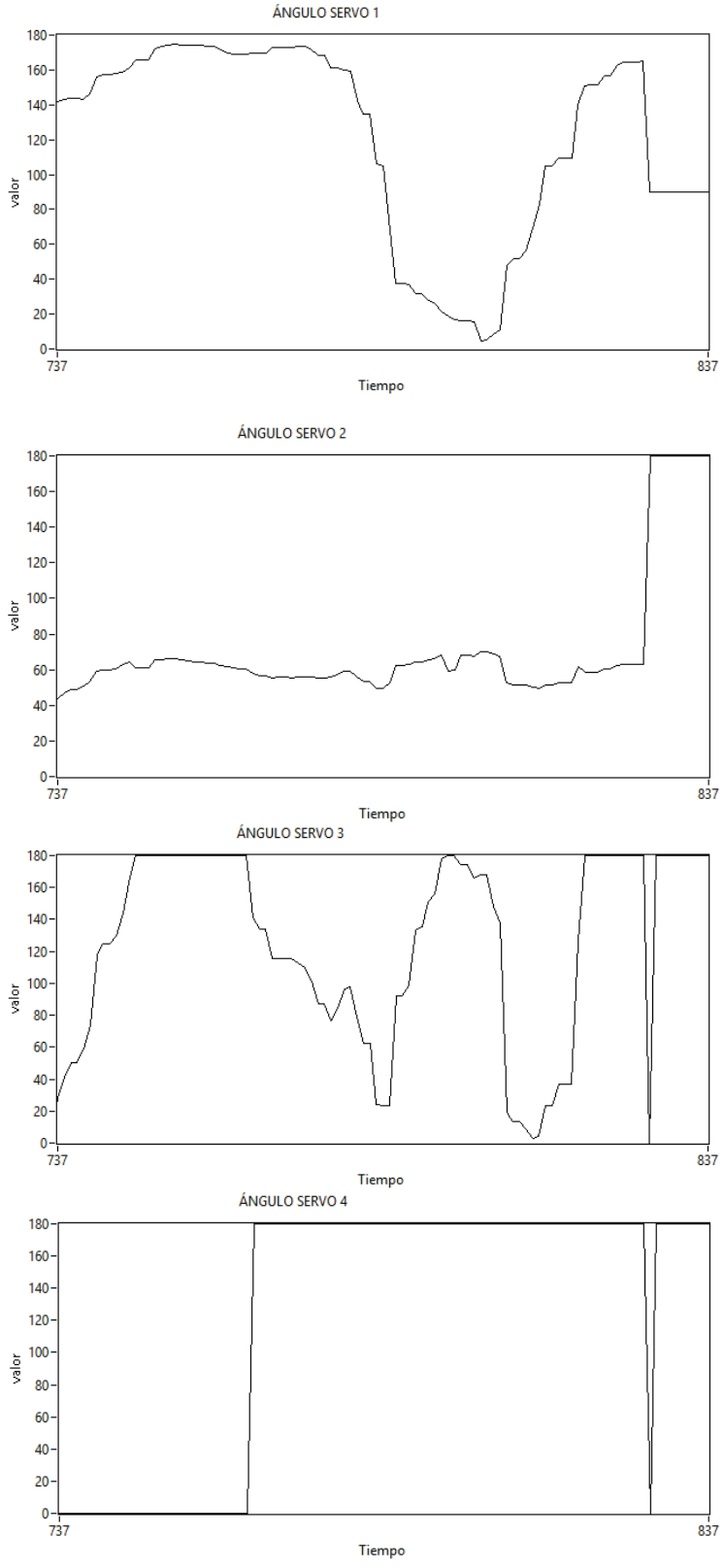


Figura 9. Valor de los ángulos durante un ciclo de movimiento del robot.

4. Conclusiones

Los resultados de este proyecto han permitido hacer uso del control electromecánico de un brazo robot de tres grados de libertad, pudiendo hacer la sujeción de un objeto en el espacio al seguir los movimientos de la mano derecha del usuario. A diferencia de investigaciones realizadas anteriormente con el controlador Leap Motion, en cuanto a accionamiento físico, este tipo de aplicación permite usar software que es accesible para un sector de personas que tienen en su plan de trabajo la interacción y uso de software como es LabVIEW, al igual que el acceso a una tarjeta de adquisición de datos como Arduino UNO R3.

Los datos que se obtuvieron al hacer las pruebas demuestran lo siguiente:

1. Las señales comandadas por el usuario son interpretadas mediante el modelo programado internamente del controlador, de la estructura de una mano.
2. El método con el que se crea el acceso al controlador está hecho por un archivo de red con extensión NET y establece la comunicación.
3. Los datos de control para las posiciones de los servomotores, son enviados a través de los bloques de programación de Arduino y se escriben en los puertos digitales.
4. El algoritmo Denavit-Hartenberg es adecuado para llevar a cabo el estudio de cinemática inversa de un robot polar.
5. La estabilidad de los servomotores cambia de manera abrupta, pues estos dependen de cada iteración que es emitida por el ciclo while del diagrama de bloques de LabVIEW.
6. La manipulación de un objeto se puede realizar por medio de movimientos corporales sin la necesidad de utilizar guantes o un controlador que deba ser sostenido por el usuario.

Se puede mencionar que para un trabajo futuro, los materiales de construcción pueden mejorar, por lo que se está llevando actualmente el diseño de un robot elaborado en aluminio, con servomotores constituidos por engranajes de titanio, con un torque equivalente a 3.8 veces el que corresponde a los MG995. Esta estructura será sometida a un análisis de elemento finito en ANSYS Workbench, para determinar los puntos en donde ocurren los esfuerzos mayores y mejorar el diseño, llegando a obtener la robustez necesaria para una manipulación de objetos pesados. Los resultados además permiten migrar la base de que un controlador puede ser usado para la activación y obtención de datos de un robot industrial, como lo son robot FANUC, también destinados a actividades de enseñanza.

Referencias

[1] Barrientos, A., Peñ, L. F., & Balaguer, C. (2007). *Fundamentos de robţica (2a. ed.)*. Espaą: McGraw-Hill Espaą.
[2] Chen, S., Ma, H., Yang, C., & Fu, M. (2015). *Hand Gesture Based Robot Control System Using Leap Motion*. In ICIRA 2015 Proceedings, Part I, of the 8th International Conference on Intelligent Robotics and Applications - Volume 9244 *(pp. 581–591)*.
[3] Gunawardane, H., Medagedara, N., & Madhusanka, A. (2017). *Control of Robot Arm Based on Hand Gestures Using Leap Motion Sensor Technology*. Journal of Robotics and Mechatronics, 3(1), 7–14.
[4] Pititeeraphab, Y., Choitkunnan, P., Thongpance, N., Kullathum, K., & Pintavirooj, C. (2016). *Robot-arm control system using LEAP motion controller*. In 2016 International Conference on Biomedical Engineering (BME-HUST) (pp. 109–112).
[5] Trinadh, V., Sarosh P. *Real-Time Robot Control Using Leap Motion A Concept of Human-Robot Interaction*. 2015.
[6] Moldovan, C., Ionel S. *"An Anthropomorphic Hand with Five Fingers Controlled by a Motion Leap Device."* Procedia Engineering, vol. 181, 2017, pp. 575–582.

[7] Bassily, D., et al. "*Intuitive and Adaptive Robotic Arm Manipulation Using the Leap Motion Controller*." Proceedings of the Joint Conference of the 45th International Symposium on Robotics (ISR 2014) and the 8th German Conference on Robotics (ROBOTIK 2014), 2014, pp. 1–7.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 8, pp.87 - 93, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Sensor para la Caracterización de la Radiación Solar Especifica en el Instituto Tecnológico de Puebla

Omar Arturo Castillo Méndez, Jaime Estevez Carreón, Daniel Cadena Rodríguez, Jesús Mendez Cruz y Yolanda Leticia Trujillo Andrade

Maestría en Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Puebla, Puebla, México.
omar.arturo.91@outlook.com

Resumen

Se presenta diseño de un sensor para la medición de la radiación solar en una ubicación especifica en Instituto Tecnológico de Puebla, Puebla, México. Con la finalidad de visualizar el comportamiento de la radiación en función de la temperatura. Se propone un modelo térmico para después proceder con el armado del dispositivo y posteriormente la prueba física del comportamiento en condiciones especificas dentro del Instituto Tecnológico de Puebla.

Palabras clave: Radiación Solar, fotovoltaico, temperatura, ITPue, energía solar.

1. Introducción

La radiación solar es una fuente de energía renovable, y no contaminante al medio ambiente, por lo que el aprovechamiento de este recurso es fundamental para la demanda energética que actualmente va en aumento junto con el desarrollo de la tecnología. Las áreas de aplicaciones más comunes de la radiación solar son: térmica y fotovoltaica.

La aplicación fotovoltaica está en gran auge en México, y en continuo crecimiento el uso de este recurso; no obstante, este es cambiante en menor o mayor proporción, según distintos factores ambientales como: posición global, clima, altitud, entre otros.

De tal manera que, para el correcto aprovechamiento de este recurso, hay que considerar algunos factores que pueden influir, en un lugar en específico.

En la explanada del Instituto Tecnológico de Puebla, se realizaron las respectivas pruebas experimentales y teóricas, que es el sitio de interés, y dicha información será de utilidad para posteriores estudios y/o análisis que se realicen en el mismo.

2. Marco Conceptual

2.1 Radiación solar

Se conoce como radiación al proceso físico por medio del cual se trasmite energía en forma de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz(3000,000km./s.) [1]

2.1.1 Tipos de transferencia de calor

Los tipos de transferencia de calor:
Radiación: se refiere a la emisión continua de energía en forma de ondas electromagnéticas originadas en el nivel atómico.

La conducción: es el proceso por el que se transfiere energía térmica mediante colisiones de moléculas adyacentes a lo largo de un medio material. El medio en si no se mueve.
La convección: se ha definido como el proceso por el que el calor es transferido por medio del movimiento real de la masa de un medio material [1].

2.2 Medida de Temperatura

La medida de temperatura constituye una de las mediciones más comunes y más importantes que se efectúan en los procesos industriales. Las limitaciones del sistema de medida quedan definidas en cada tipo de aplicación por la precisión, la velocidad de captación de la temperatura, por la distancia entre elementos de medida y el aparato receptor y por el tipo de instrumento indicador, registrado o controlador necesarios; es importante señalar que es esencial una comprensión clara de los distintos métodos de medida con sus ventajas y desventajas propias para lograr una selección optima del sistema más adecuado [2].

Los instrumentos de medición utilizan diversos fenómenos que son influidos por la temperatura, por ejemplo:

a) Variaciones en volumen o en estado de los cuerpos (sólidos, líquidos o gases);
b) Variación de resistencia de un conductor (sondas de resistencia);
c) Variación de resistencia de un semiconductor(termistores)
d) f.e.m. creada en la unión de dos metales distintos(termopares)
e) Intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo (pirómetros de radiación);

2.3 Sensor de Temperatura

El circuito integrado LM35, es un sensor analógico de la casa Texas Instruments, permite realizar medidas de temperatura de una forma bastante precisa a través de las entradas analógicas sin necesidad de emplear ninguna librería específica para su programación [3]. Es un sensor que presenta únicamente 3 pines (VCC, GND y Data). Por ello su conexión es muy sencilla. Este sensor tiene una salida analógica proporcional a la temperatura que registra (pin del centro). Además, presenta las siguientes características eléctricas [4]:

- Calibrado en grados Celsius
- Rango de medición de -55 °C a 150°C
- la tensión de salida en proporcional a la temperatura (1°C= 10mV)
- Presenta una precisión de 0.5°C
- rango de alimentación entre 4 y 30V
- Presenta baja impedancia de salida
- Presenta baja corriente de alimentación

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 8, pp.87 - 93, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

3. Desarrollo Experimental

3.1 Desarrollo

Se elaboró un dispositivo para medir la radiación solar, con la finalidad de medir la radiación solar en el Instituto Tecnológico de Puebla, Puebla, México. Se consideró posición global como parte de las ecuaciones representadas por el esquema mostrado en la figura 1:

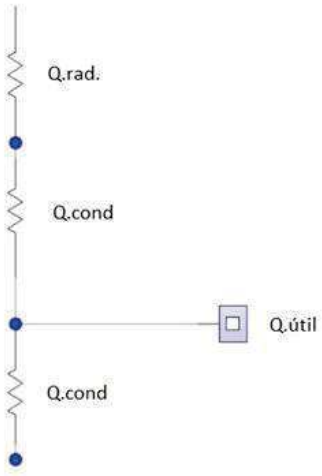


Figura 1. Diagrama térmico del prototipo para medir la radiación solar.

Donde [5]:

Ecuación de transferencia de calor por radiación

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \qquad (1)$$

ε : Emisividad
σ : Constante de radiación del cuerpo negro
A_s : Superficie
T_s^4 : Temperatura de la superficie en Kelvin

Ecuación de transferencia de calor por conducción

$$\dot{Q}_{cond} = -kA\,\frac{\Delta T}{\Delta x} \qquad (2)$$

-k : Conductividad térmica del material
A : Superficie
$\frac{\Delta T}{\Delta x}$: Gradiente de temperatura

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 8, pp.87 - 93, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Ecuación de transferencia de calor por convección

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \qquad (3)$$

h : coeficiente de transferencia de calor por convección.
A_s : superficie de contacto.
T_s : temperatura de la superficie.
T_∞ : temperatura del ambiente

A partir del diagrama anterior se evaluó la parte teórica para visualizar el comportamiento del prototipo a diferentes parámetros de interés para el desarrollo del dispositivo.
Para el modelo matemático se utilizó la herramienta computacional MATLAB® para el cálculo del modelo propuesto. En la siguiente grafica se muestra el comportamiento teórico de la temperatura, :

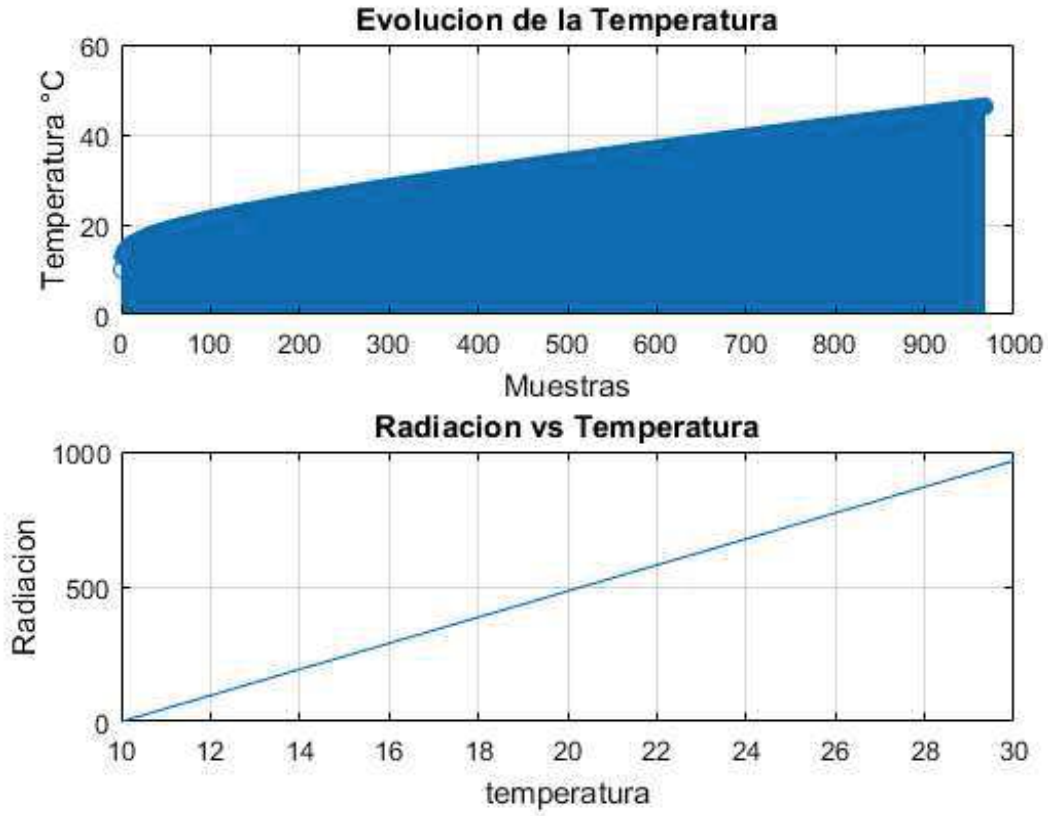


Figura 2. Comportamiento de la temperatura y radiación solar

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 8, pp.87 - 93, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

4. Resultados

4.1 Elaboración del dispositivo

Los materiales que se utilizaron son los siguientes:

- Placa de aluminio de 5cm de diámetro
- Semiesfera de cristal de 0.5 mm
- Sensor de temperatura LM35

En la siguiente imagen (Fig. 3) se muestra el prototipo para las pruebas de campo, para la ubicación en el Instituto Tecnológico de Puebla.

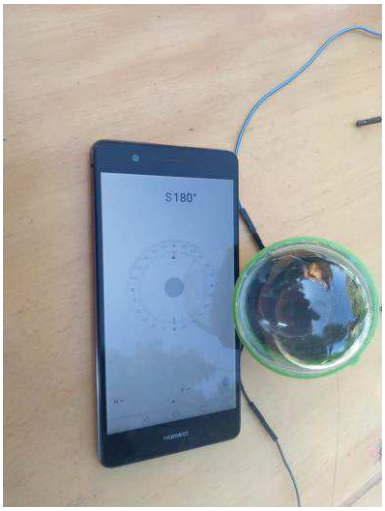


Figura 3. Dispositivo para pruebas de radiación solar normal a superficie.

A continuación, se muestran las gráficas Figura 4 y Figura 5, el comportamiento en función del tiempo y de milivolts(mV) respectivamente, obtenidas del procedimiento experimental con relación al voltaje de salida del sensor y la temperatura registrada por el mismo. manual.

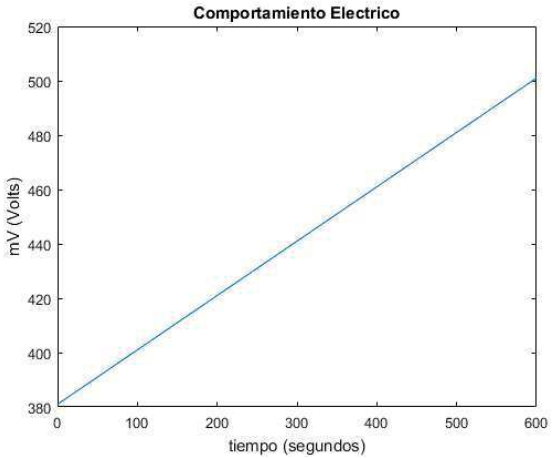


Figura 4. Grafica obtenida de los resultados registrados del sensor

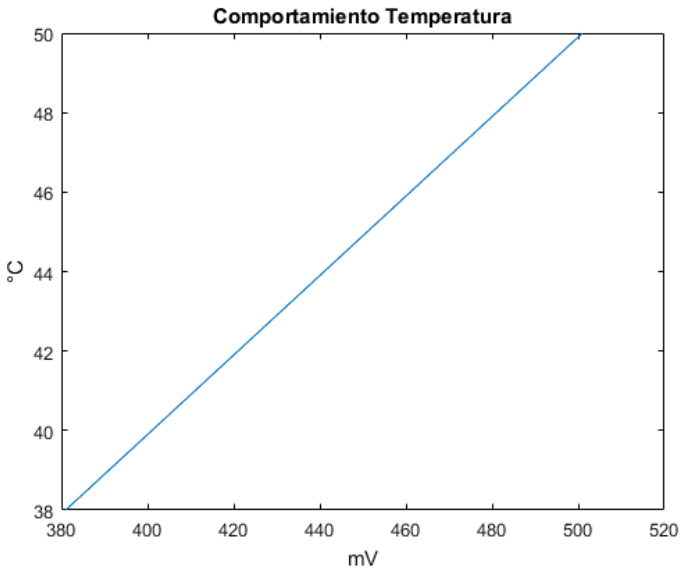


Fig. 5 Grafica Obtenida de la relación voltaje vs temperatura

Además, en la Figura 6 evidencia experimental de las pruebas realizadas con un multímetro para el registro de los datos de manera manual.

Figura 6. Registro de Datos experimentales del prototipo

4. Conclusiones

En este trabajo de investigación se estudió el comportamiento del prototipo construido para la medición de la radiación solar en la ubicación del Instituto Tecnológico de Puebla, se realizó con la finalidad de cuantificar la energía solar con un prototipo y visualizar su comportamiento a través de las pruebas realizadas, considerado las ecuaciones de comportamiento de transferencia de energía térmica y su medición para monitoreo y sus variaciones según las condiciones climáticas de la ubicación geográfica del Instituto Tecnológico de Puebla, Puebla, México.

De acuerdo con lo observado en durante el experimento se está visualizando el comportamiento del prototipo con un periodo breve de ambientación para obtener datos más fiables durante la prueba, además disminuir el porcentaje de error con relación a las mediciones elaboradas contra lo calculado en teoría.

Durante el desarrollo y la época del año, con relación al prototipo es necesario continuar con más pruebas durante el año para registrar el comportamiento, por el momento solo se tienen datos del periodo del mes de noviembre y diciembre. Además de aplicar las mejoras correspondientes al diseño térmico y electrónico del sensor para poder ser adaptado a una tarjeta de adquisición de datos para el procesamiento de estos, en tiempo real.

Para un mejor funcionamiento del sensor se pretende realizar el cambio de los aislamientos térmicos y cambiar con otros sensores de distinta sensibilidad, las ecuaciones y los resultados obtenidos son específicos de la ubicación geográfica, por lo que pueden variar en donde se realicen las pruebas y los comportamientos esperados de forma empírica sean distintos a los obtenidos en este documento.

Referencias

[1] Tippens, P. (2007). “*Física, Conceptos y Aplicaciones”.* México, D.F.: MCGraw-Hill
[2] Creus, S. A. (1997). “*Instrumentación Industrial”.* Barcelona, España: Marcombo, S.A.
[3] Texas Instruments. (2017). “*LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors”*. Dallas, Texas: Autor.
[4] Tojeiro, G. (2014). “*Taller de Arduino un Enfoque Práctico para Principiantes”.* Barcelona: Macombo.
[5] Cengel, Y. A. (2007). “*Transferencia de Calor y Masa”.* México, D.F.: Mc-Graw Hill Interamericana

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 9, pp.94 - 106, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Diseño y Construcción de un Levitador Magnético

D. González[1], S. Vergara[1], M. A. Vargas[1], F. Reyes[1] y A. Palomino[1].
Facultad de Ciencias de la Electrónica, Maestría en Ciencias de la Electrónica opción en Automatización.
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
Puebla, Pue. México.
dm.gar93@gmail.com

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño mecánico, el análisis del modelo dinámico y el desarrollo de la parte electrónica necesaria para la construcción de un levitador magnético. Se muestra el desarrollo del control para dicho mecanismo mediante el uso de un sistema embebido basado en un FPGA Cyclone V, que cuenta con un gran número de terminales de usuario que nos permite conocer la altura del imán en cualquier momento, así como controlar el electroimán, el cual es utilizado para generar el campo magnético que al interactuar con el campo del imán permanente se genera el efecto de repulsión y por consecuencia la fuerza que produce la levitación. Se propone el uso de PWM (modulación por ancho de pulsos) para regular la corriente que fluye a través de la bobina, esto nos permite reducir en gran medida la electrónica necesaria ya que solo se necesita una fuente de voltaje fija y un bit de control para el ciclo de trabajo.

Palabras clave: FPGA, levitador, magnético.

1. INTRODUCCIÓN

La automatización es un área estratégica en el desarrollo de un país, permite que la producción de bienes se realice en menor tiempo y en mayor cantidad respecto a procesos manuales. Además, la precisión de las maquinas muchas veces llega a ser mejor que lo que se pudiera lograr manualmente, lo anterior elimina las fallas humanas, incrementa la calidad y la velocidad de producción, esto reduce los costos y mejora la competitividad de las empresas respecto a sus pares en otros países.

Los fenómenos magnéticos fueron conocidos por los antiguos griegos. Se dice que por primera vez se observaron en la ciudad de Magnesia del Meandro en Asia Menor, de ahí el término magnetismo.

Los sistemas de levitación magnética han sido objeto de estudios en las últimas décadas, por lo importante que resultan ser en la disminución de la fricción debido al contacto. Dichos sistemas se han vuelto populares en sistemas de transportación terrestre de alta velocidad, rodamientos magnéticos y sistemas de aislamiento de vibraciones, de manera particular, los rodamientos magnéticos han tenido gran demanda en la industria de ingeniería de precisión donde se necesita alcanzar un posicionamiento con tolerancias de error en el orden de nanómetros [1], Además hay una diversidad de aplicaciones como actuadores libres de contacto [2, 3, 4, 5], bombas cardiacas usando impulsores de levitación magnética [6]. Hoy día el uso más extendido del fenómeno de levitación magnética se usa en los trenes de levitación magnética. Un tren de levitación magnética es un vehículo que utiliza la interacción magnética para suspenderse por encima del carril (algunos de estos trenes van a 1 cm por encima de la vía y otros pueden levitar hasta 15 cm) e impulsarse a lo largo de un carril-guía.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 9, pp.94 - 106, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

La levitación consiste en mantener un objeto suspendido en el aire sin ningún tipo de contacto. En el caso de la levitación magnética, se puede encontrar dos principios básicos, principio de levitación por atracción y principio de levitación por repulsión. Esta fuerza electromagnética es generada por un electroimán que mediante atracción o repulsión permite mantener en suspensión un objeto. En este trabajo la levitación se hace por medio de la repulsión.

2. DIAGRAMA GENERAL DEL SISTEMA

En la Figura 1 se muestra el modo en que se implementa la repulsión magnética, se hace fluir una corriente *"Ic"* a través del electroimán para generar una fuerza de repulsión *"Fc_1m"* que contrarreste la fuerza de gravedad *"g"* y se genere una altura *"y"*.

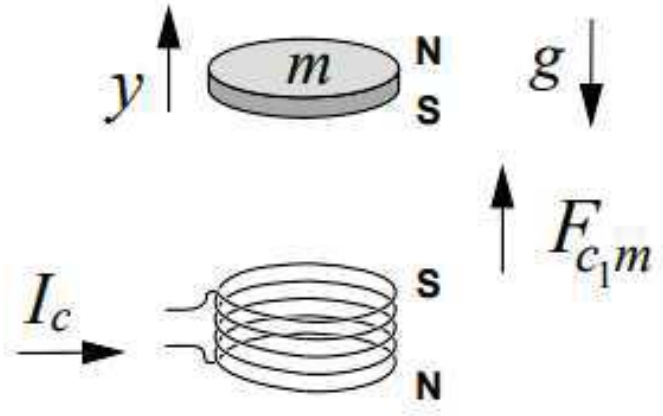


Figura 1. Implementación de la repulsión magnética.

En la Figura 2 se muestra el diagrama general del sistema mecatrónico, el cual se compone de una bobina de 2700 vueltas de cable de cobre calibre 18 con núcleo de hierro, este se usa como electroimán para generar el campo magnético, un imán permanente de neodimio en forma de disco de 3 pulgadas de diámetro exterior, ½ pulgada de diámetro interior y ¼ de pulgada de grosor, dos sensores de distancia, la etapa de potencia y un convertidor analógico digital, se cuanta con una interfaz de usuario generada en Labview para que el usuario controle la posición deseada así como las ganancias del controlador.

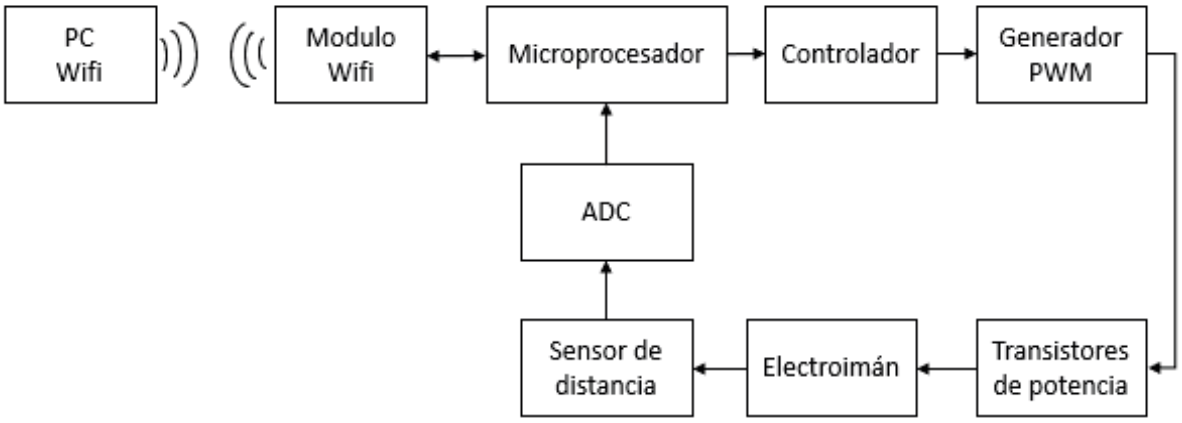


Figura 2. Diagrama general del sistema mecatrónico.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 9, pp.94 - 106, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Para el control del robot se cuenta con un sistema embebido basado en un FPGA de la familia Cyclone V de la marca Altera, este se encargará del control de la altura del imán en la posición deseada mediante el generador PWM, para esto el FPGA obtiene la altura actual, leyendo el valor digital del convertidor externo.

3. DISEÑO DE LA MECÁNICA DEL ROBOT

Para el diseño mecánico es necesario usar aluminio ya que es un material que no se ve afectado por el campo magnético. Se propuso una estructura con una barra de aluminio superior y una inferior unidas por dos perfiles de aluminio para dar soporte, un cilindro de Nylamid lubricado del mismo diámetro que el interior del imán permanente, para que este sirva de guía y que pueda subir y bajar el imán con el menor rozamiento. Se coloco un sensor de distancia en la parte superior y otro en la parte inferior, esto con la finalidad de conocer en todo momento la posición del imán, fueron necesarios dos sensores por que el sensor seleccionado no puede realizar mediciones a distancias menores a ocho centímetros, al combinar la medición de los dos sensores se soluciona este problema. Se hizo una cada de acrílico en la parte inferior sobre la cual iría todo el sistema mecánico, y en su interior iría toda la parte electrónica y el electroimán.

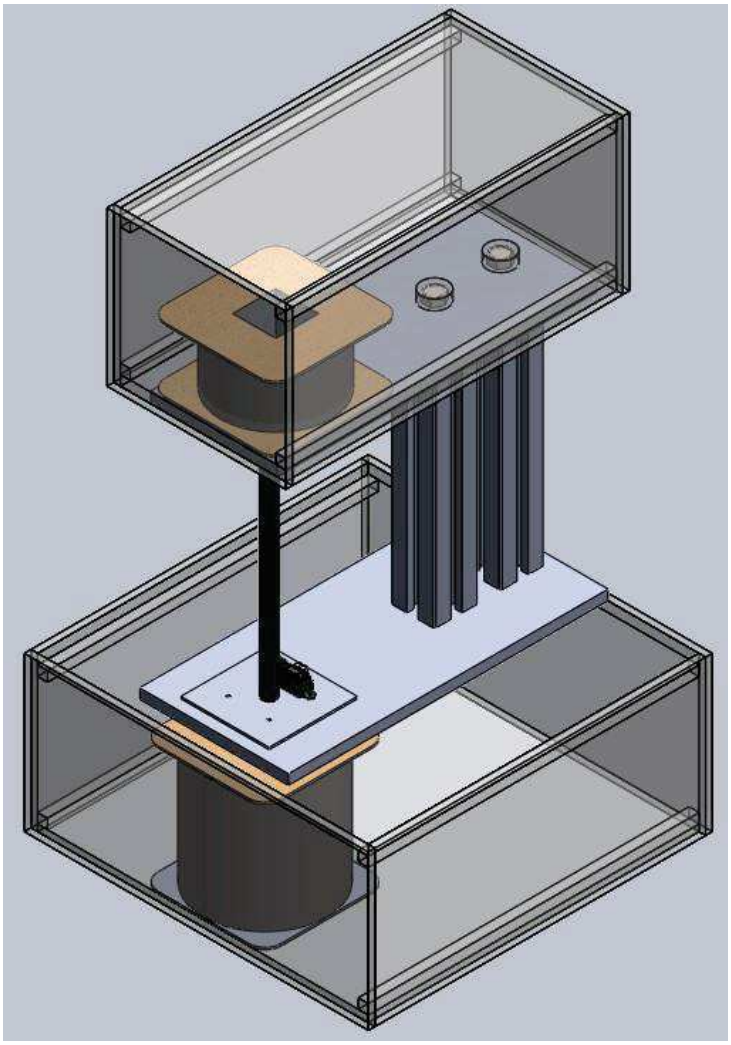


Figura 3. Diseño propuesto del levitador magnético.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 9, pp.94 - 106, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

4. MODELO DINÁMICO

Ya que este sistema solo cuenta con un grado de libertad, podemos obtener el modelo dinámico con una sumatoria de fuerzas.

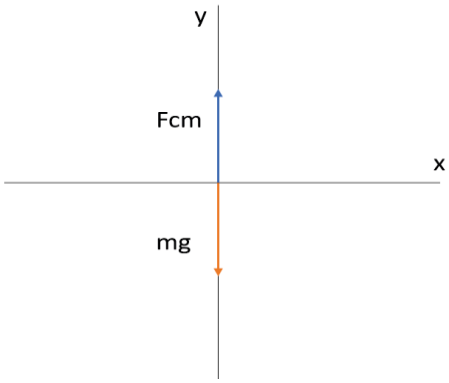


Figura 4. Sumatoria de fuerzas en el eje "y".

En la figura 4 se observa que solo se presentan dos fuerzas actuando sobre el imán, la fuerza de repulsión creada entre el imán y el electroimán, y la fuerza de gravedad multiplicada por la masa del imán, tomando en cuenta una pequeña fricción "c" entre el imán y el eje por donde se desliza que se modela como viscosa.

$$m\ddot{y} + c\dot{y} = Fcm - mg \tag{1}$$

donde:
y es la altura en metros (*m*).
m es la masa en kilogramos (*kg*).
c es la fricción viscosa en Newton metro sobre segundo (*N·m/s)*.
Fcm es la fuerza de repulsión magnética en Newtons (*N*).
g es la gravedad en metros sobre segundos al cuadrado(*m/s^2)*.

Una fuerza conservativa es aquella que deriva de un potencial. La relación entre la fuerza y el potencial viene dada por

$$F(x) = -\frac{dU(x)}{dx} \tag{2}$$

La fuerza magnética de repulsión entre dos imanes (en una dimensión) es aproximadamente de la forma

$$F(x) = \beta x^{-n} \tag{3}$$

siendo β y *n* constantes y *x* la distancia entre los imanes. Esta es una fuerza conservativa, cuyo potencial es

$$U(x) = \frac{\beta}{n-1} x^{-(n-1)} \tag{4}$$

Tomando logaritmo en la ecuación (3) y (4)

$$\log(F) = \log(\beta) - n \log(x) \tag{5}$$

$$\log(U) = \log(\beta/(n-1)) - (n-1) \log(x) \tag{6}$$

5. HARDWARE

El sistema embebido seleccionado para este trabajo es la tarjeta DE0-CV de la marca terasic, la cual cuenta con las siguientes características:

- Cyclone V 5CEBA4F23C7N
- 49 mil elementos lógicos programables
- 3080 Kbits de memoria embebida
- 4 PLLs fraccionales
- Configuración serial
- Programador USB BLASTER onboard
- 64 MB SDRAM
- 2x20 GPIO
- 10 leds
- 10 switches deslizables
- 4 push buttons

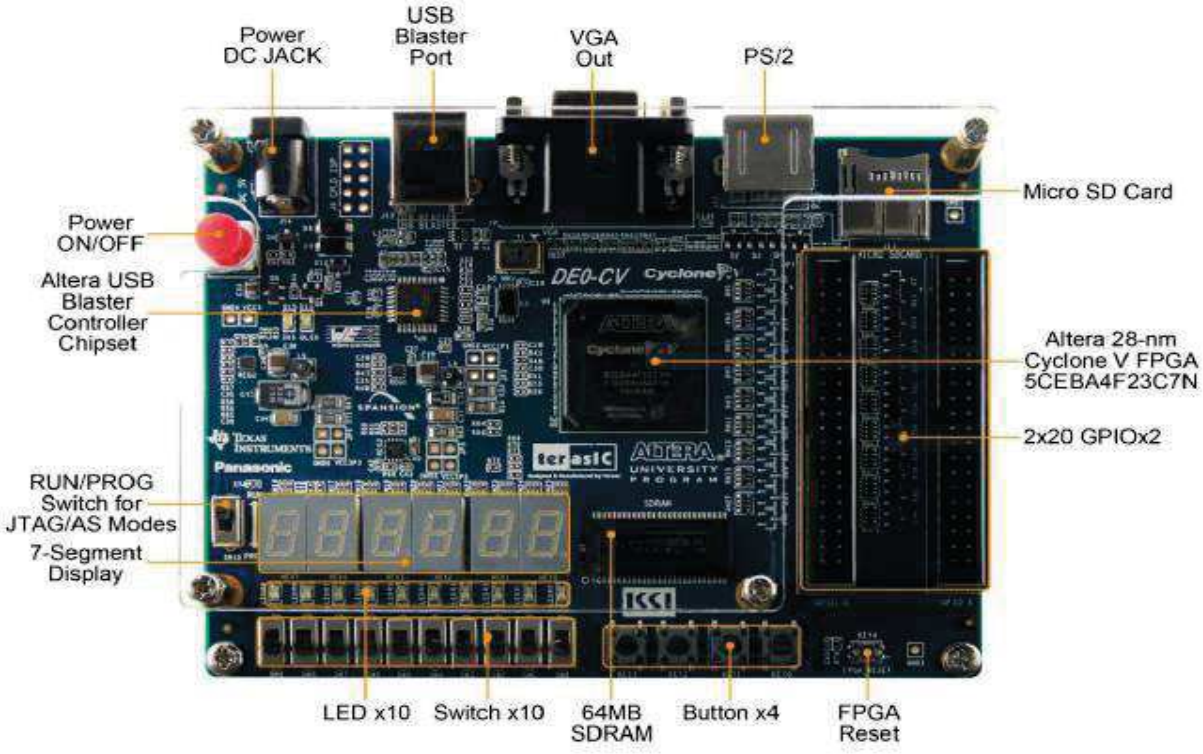


Figura 5. DE0-CV.

Para le etapa de potencia hizo uso de un transistor BJT en arreglo Darlington el cual sigue la señal PWM proveniente del sistema embebido, de esta manera se regula la corriente que se le suministra a la bobina y por lo tanto la altura del imán.

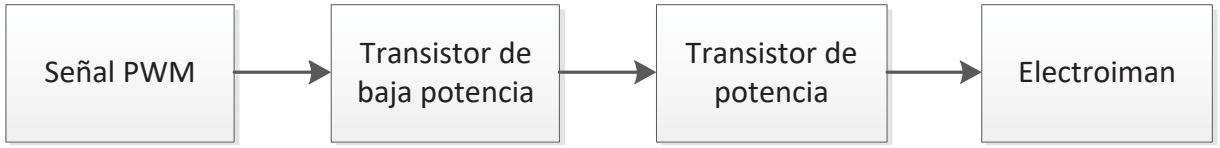


Figura 6. Diagrama etapa de potencia.

Se propone el uso de un sensor de tecnología infrarroja.

Se usa un LED infrarrojo que emite una onda electromagnética en el rango infrarrojo. Esta onda electromagnética viaja desde el LED hasta encontrar un objeto con el que rebota, para detectar el regreso de la onda emitida se usa un fototransistor, este dispositivo se diferencia de un transistor común porque su base ha sido sustituida por un cristal fotosensible que regula el flujo de corriente colector – emisor de acuerdo con la luz incidente sobre él (en nuestro caso luz infrarroja). Para este trabajo se usó el sensor Sharp GY2Y0A21YK (figura 7).

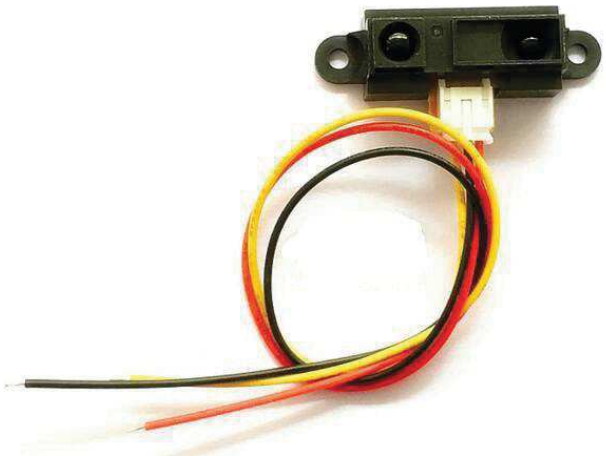


Figura 7. Sensor Sharp 2Y0A21

Se realizo la caracterización del sensor y se obtuvo la relación entre el voltaje entregado y la distancia medida. En la figura 8 y 9 se muestra el comportamiento de el sensor superior e inferior respectivamente, se observa que cada sensor tiene una zona donde se puede conocer la distancia medida con una relación polinómica, en el caso del sensor superior es de 0 a 12 centímetros, por su parte con el sensor inferior podemos obtener la medición de 6 a 18 centímetros, tomando solo estos rangos de trabajo podemos usar ambos sensores para abarcar de 0 a 18 centímetros, esto es posible conmutando entre ambos sensores como se muestra en la figura 10.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 9, pp.94 - 106, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

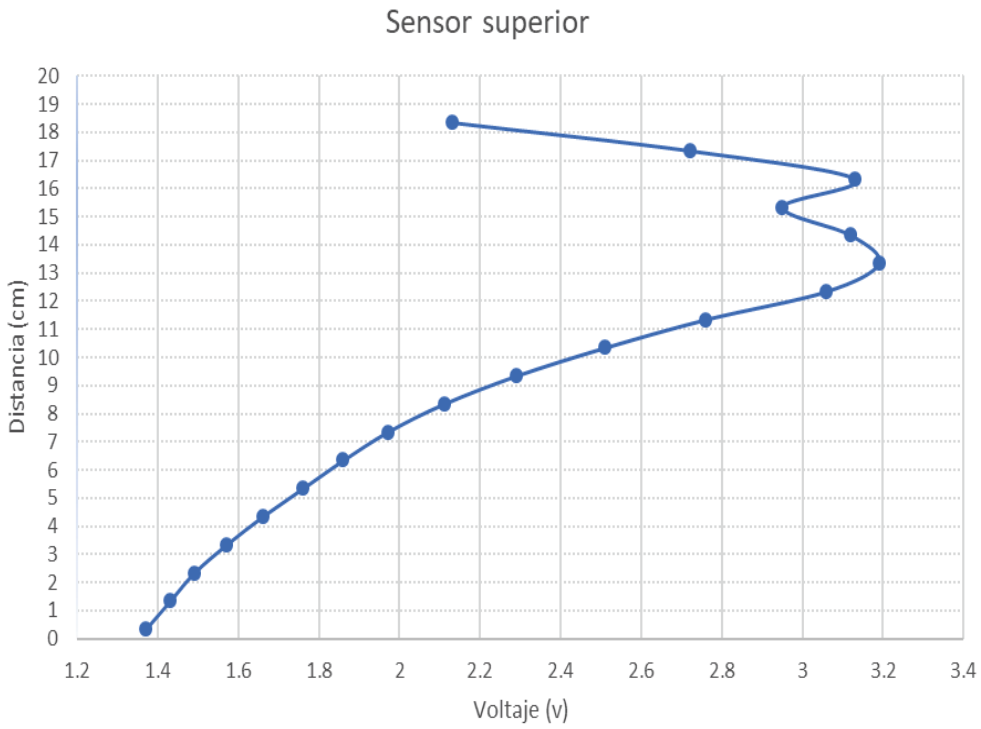


Figura 8. Grafica de comportamiento de sensor superior

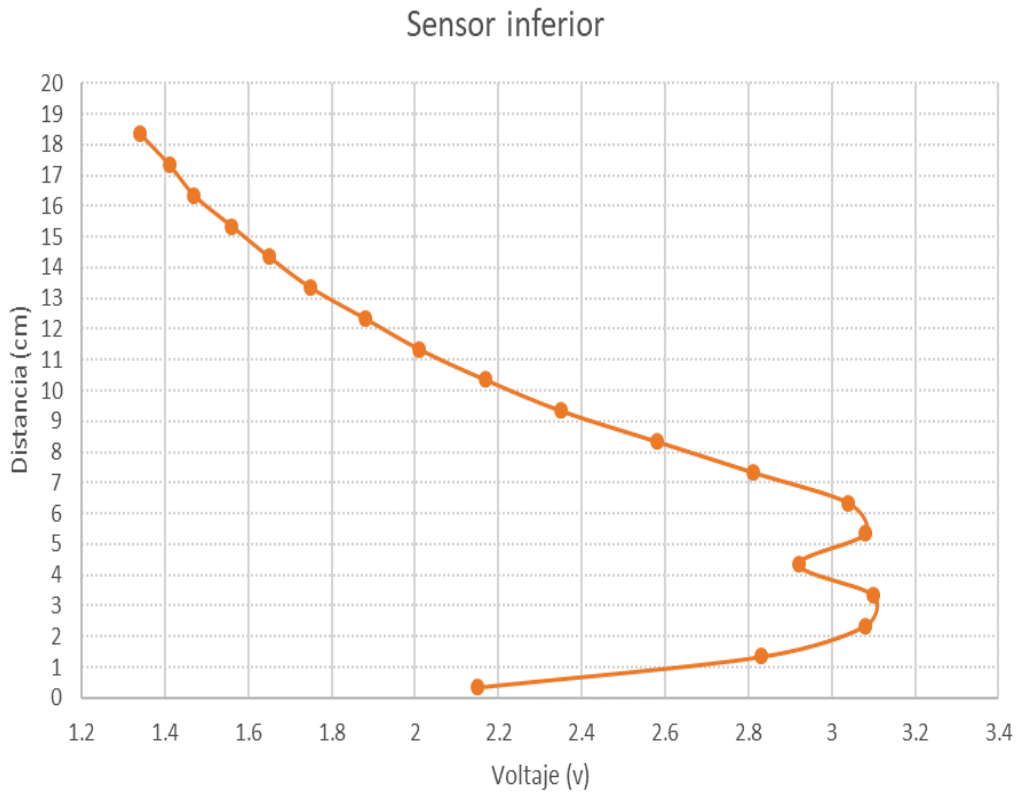


Figura 9. Grafica de comportamiento de sensor inferior.

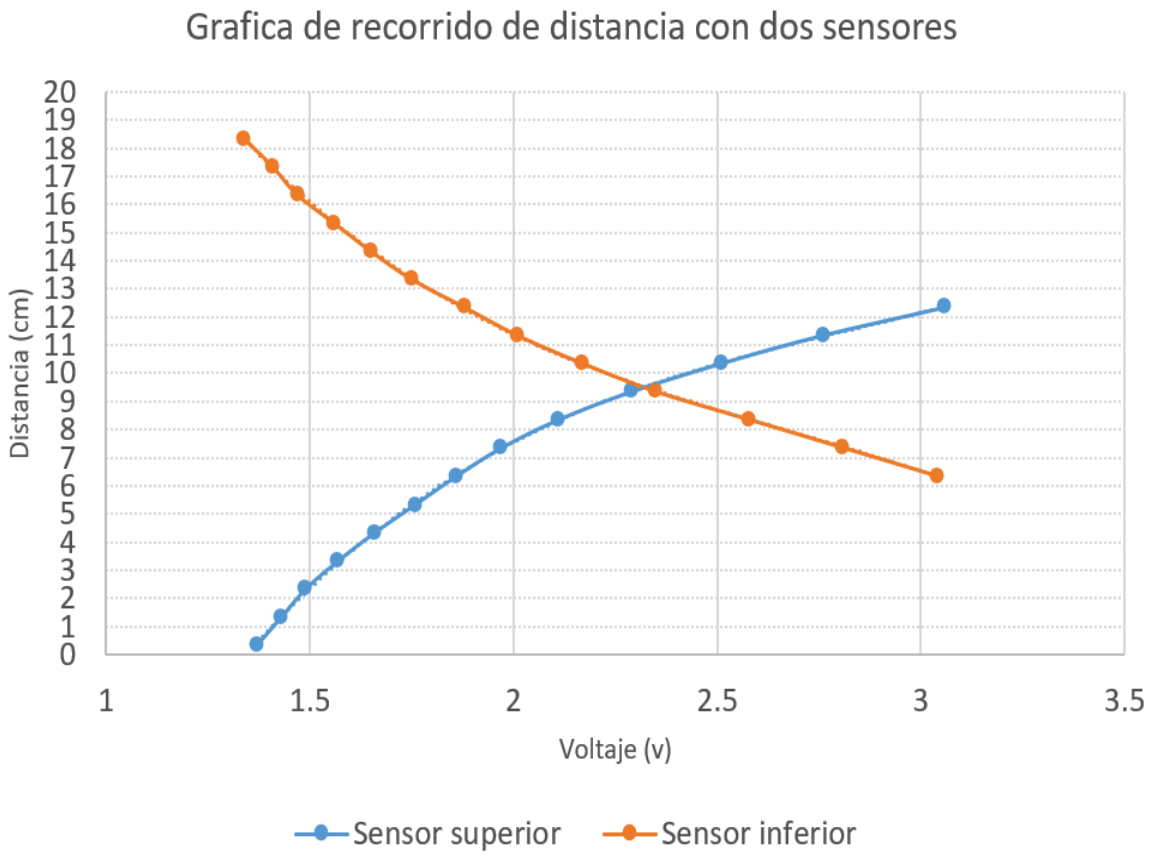


Figura 10. Grafica de comportamiento de ambos sensores juntos.

Se obtiene la ecuación que describe el comportamiento de los sensores.

Sensor superior:

$$y = 1.8956x^3 - 16.173x^2 + 49.45x - 41.825 \quad (7)$$

Sensor inferior:

$$y = -2.0499x^3 + 16.377x^2 - 47.797x + 57.865 \quad (8)$$

6. FIRMWARE

El firmware consta de un administrador de Wifi que se encarga de recibir los datos de la PC administrando la comunicación entre el módulo Wifi y el FGPA enviando y recibiendo los datos en el protocolo TCP/IP, un bloque que recibe el valor de conversión analógica a digital en paralelo de 8 bits con una frecuencia de muestreo de 1kHz, un microprocesador [7] que se encarga de realizar todos los cálculos matemáticos necesarios para el control, y un administrador de PWM que recibe el valor de ciclo de trabajo del microprocesador con una resolución de 8 bits, y lo manda a la etapa de potencia.

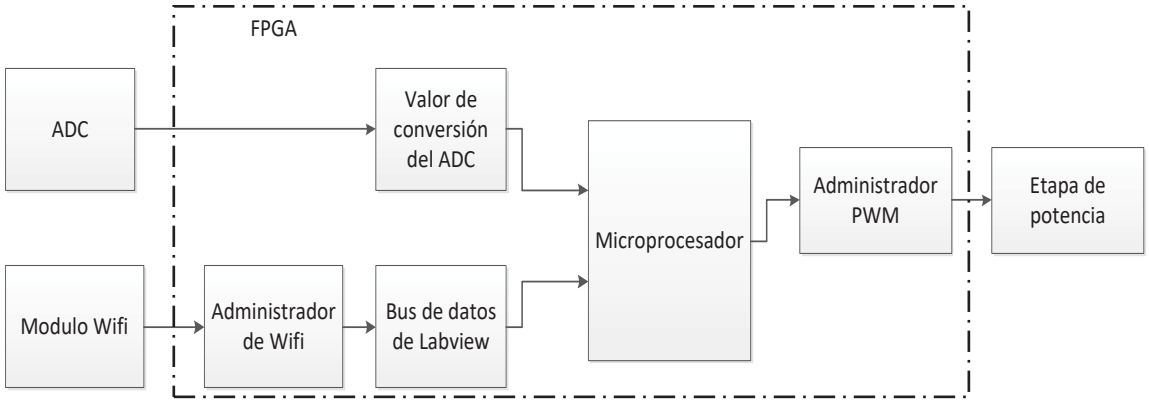


Figura 11. Diagrama de firmware.

7. SOFTWARE

El software se encarga de hacer el cálculo del control y proporcionar el ancho de pulso de PWM necesario para llevar el error de posición a cero. Obtiene el valor digital del sensor de distancia y se aplica un filtro pasa bajas digital para eliminar el ruido, se convierte en milímetros el valor digital ya filtrado y se aplica el control tangente hiperbólica para manipular el flujo de corriente eléctrica que le llega al electroimán por medio de la etapa de potencia, a la salida de la señal PWM se aplica un filtro pasa bajas para evitar la retroalimentación de armónicos en el control.

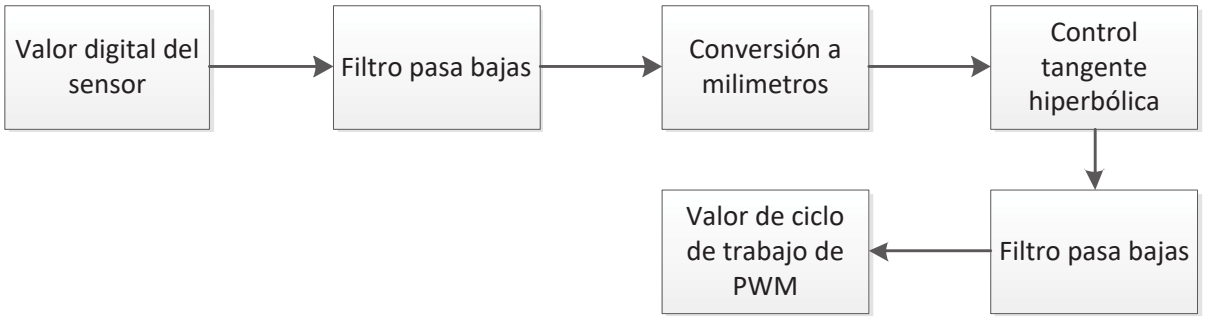


Figura 12. Diagrama software

En la figura 13 se muestra la interfaz de usuario para el control del levitador magnético, desde esta interfaz se pueden enviar constantes al microprocesador como lo son, posición deseada o ganancias del controlador, así como escribir en la memoria RAM del FPGA el programa que correrá el microprocesador.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 9, pp.94 - 106, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

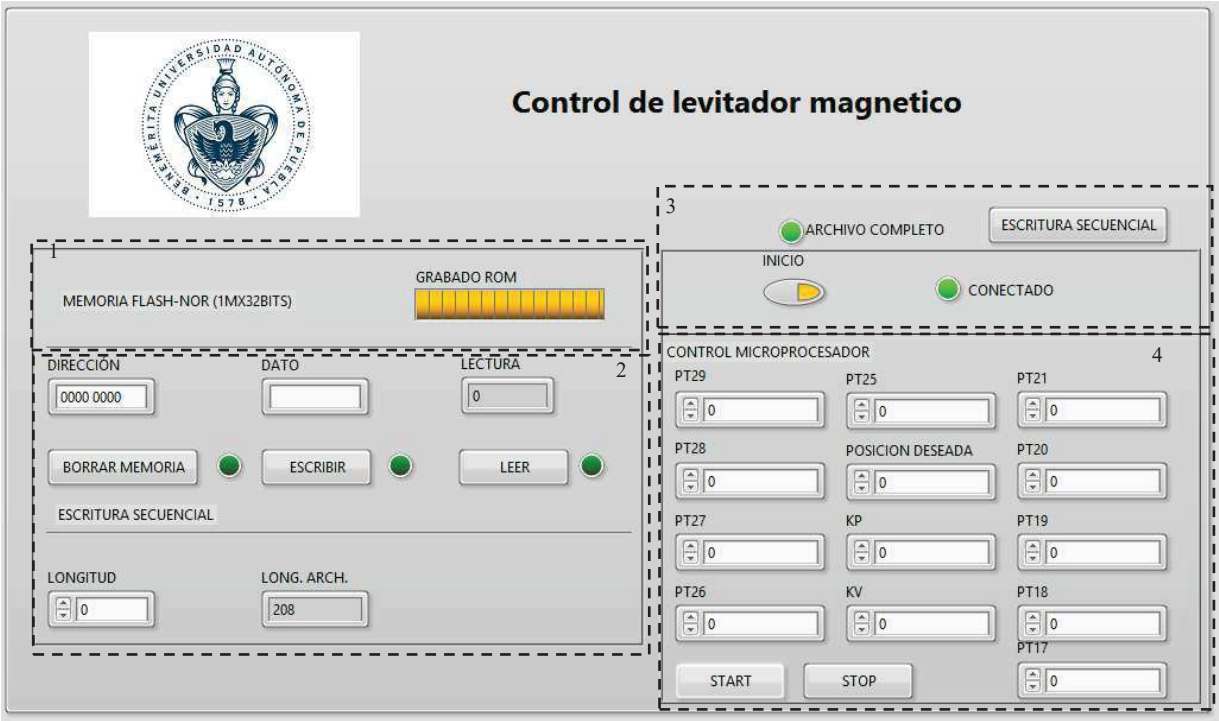


Figura 13. Interfaz de usuario

En la sección 1 se despliega una barra que indica el proceso de escritura en la memoria RAM, en la sección 2 se puede escribir directamente un dato en una dirección especifica de la memoria RAM, también se visualiza la longitud del archivo que se escribe en la memoria RAM, en la sección 3 se inicia la conexión Wifi con el botón “INICIO” y se muestra si se realizó de manera exitosa la conexión, se encuentra el botón para mandar a escribir el programa en hexadecimal, que correrá el microprocesador, en la sección 4 se encuentra los botones de “START” y “STOP” y las constantes que se pueden enviar a el microprocesador.

8. RESULTADOS

En la figura 14 se muestra el robot construido basado en el diseño propuesto, cuenta con dos electroimanes, dos sensores de posición, un imán permanente de neodimio, un eje de Nylamid, una estructura de aluminio y dos cajas de acrílico.

En la figura 15 se muestra el comportamiento de la energía suministrada para elevar el imán en relación con el ciclo de trabajo de la señal PWM que se usa para controlar.

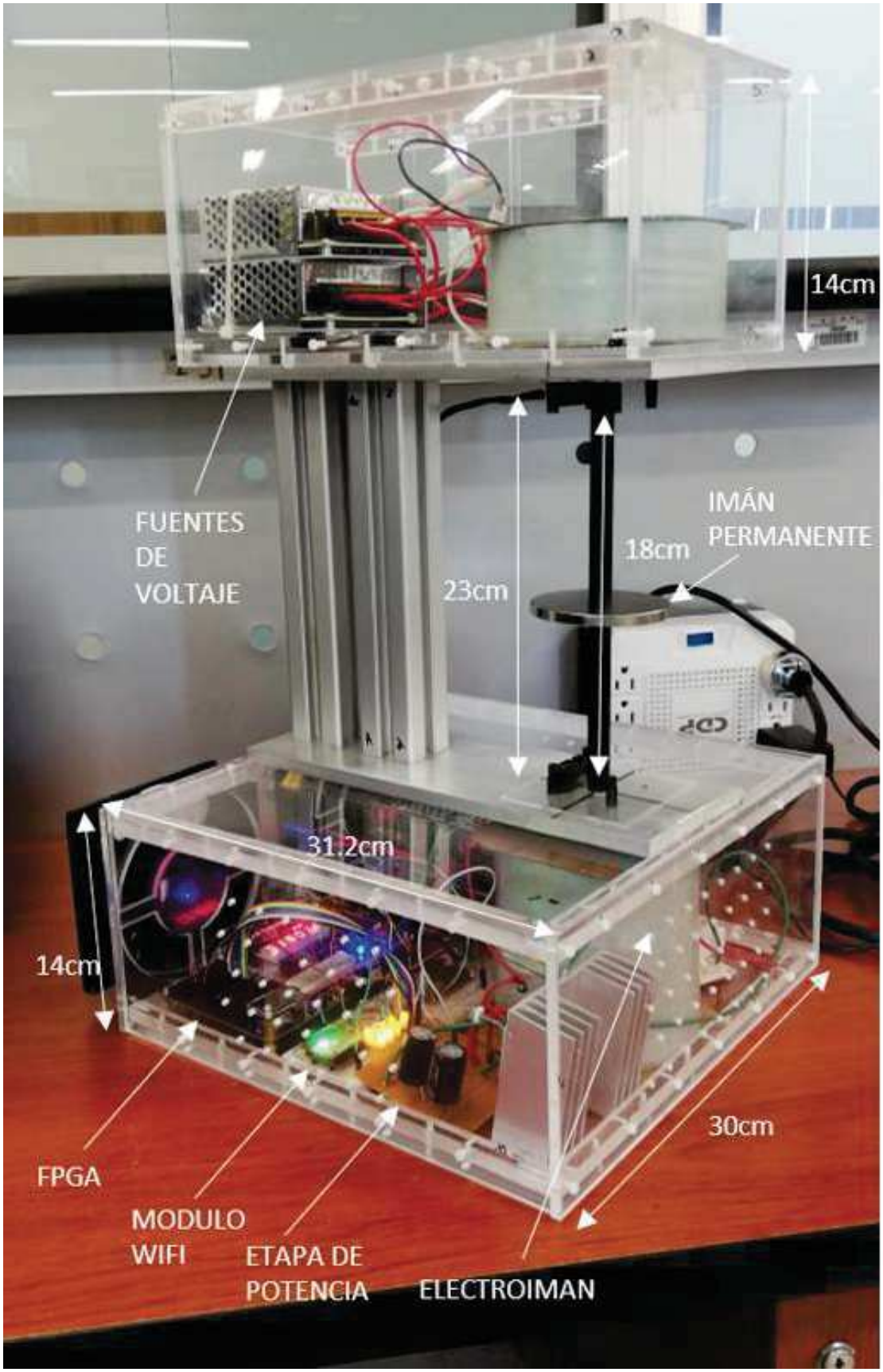


Figura 14. Levitador magnético

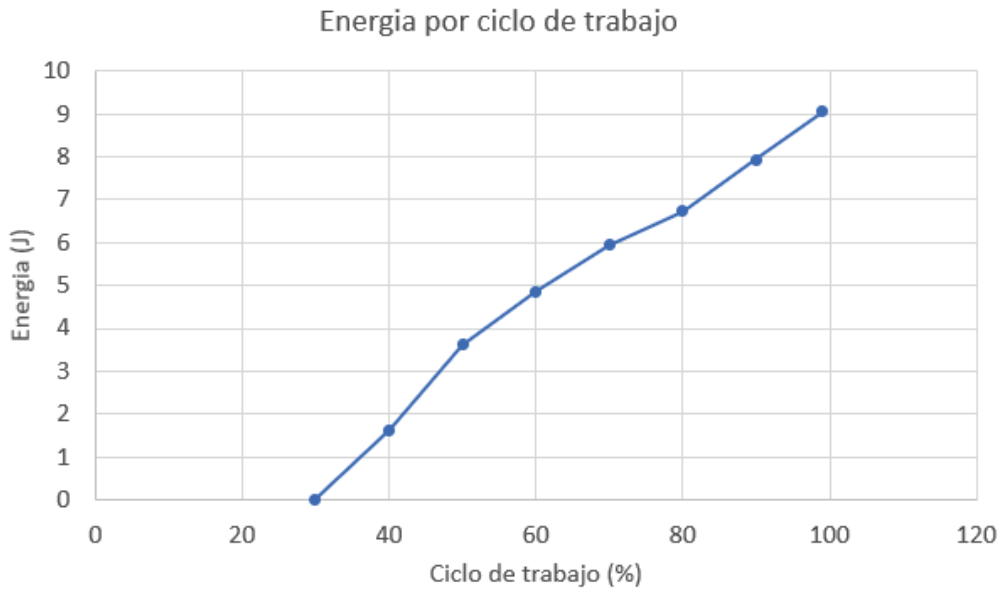


Figura 15. Caracterización de energía

La relación entre ciclo de trabajo y energía está dada por:

$$y = -0.0008x^2 + 0.2257x - 6.0432 \quad (4)$$

En la figura 16 se observa el comportamiento de posición realizado con un control tangente hiperbólico, se llegó a la posición deseada de 75 milímetros después de 2.5 segundos, no se observa sobretiro y es estable una vez se llega a la posición deseada.

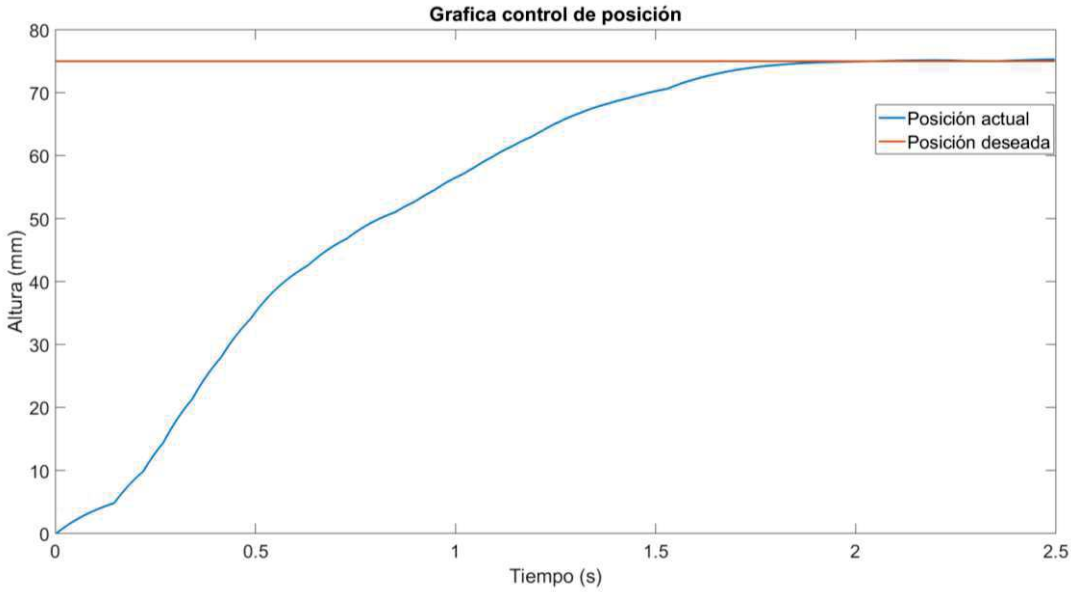


Figura 16. Grafica de control de posición con control tangente hiperbólico

9. CONCLUSIONES

El uso de la técnica de control de ciclo de trabajo de PWM para variar el flujo de corriente que se le suministra al electroimán, redujo de manera significativa la electrónica necesaria para el control de posición del imán permanente.

El uso de dos sensores de distancia soluciono el problema de la medición de a altura cuando el imán esta cercano a los sensores, esto nos permite conocer la altura del imán en todo momento.

El sistema embebido seleccionado, en combinación con el microprocesador interno fue suficiente para hacer el control de posición, así para obtener el valor digital del sensor y administrar el ancho de pulso de la señal PWM usada para controlar el campo magnético generado por el electroimán. El diseño propuesto fue viable tanto en su construcción como en su funcionamiento, permitiendo realizar pruebas sin problemas.

REFERENCIAS

[1] Eirea G., Acosta M., Bartesaghi R., y Canetti R.. “Levitador magnético: un prototipo experimental para la enseñanza y la investigación en el área del control automático” http://iie.fing.edu.uy/ geirea/pub/levit.pdf.

[2] R. Brydon, M. Maggiore, and J. Apkarian. “A high-precision magnetically levitated posi-tioning stage: Toward contacless actuation for industrial manufacturing”. IEEE Control Syst. Mag., 24(5):65–69, 2004.

[3] E. Shameli, M. Khamesee, and J. Huissoon. “Nonlinear controller design for a magnetic levitation device.” Microsystem Technologies, 2007.

[4] R. Becerril. “Output feedback nonlinear control for a linear motor in suspension mode.” Automatica, 40(12):2153–2160, 2004.

[5] D.L. Trumper, S.M. Olson, and P.K. Subrahmanyan. “Linearizing control of magnetic suspension systems.” IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.

[6] C. Samiappan, N. Mirnategui, B.E. Paden, and J.F. Antaki. “Maglev apparatus for power minimization and control of artificial hearts.” IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., 16(1):13–18, 2008.

[7] G. Zepeda Arce, “Diseño e implementación de un microprocesador RISC de 32 bits en una tarjeta con FPGA y comunicación inalámbrica”, Revista de ciencias de la ingeniería y tecnología (RECIT) vol, 1, No. 1. 2017.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 10, pp.107 - 126, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Innovación en el Área de Confección de Prendas de Vestir Mediante Gestión de la Tecnología

Ramírez Escamilla Nydia Esther[1], Alemán Pérez Berenice Wendoline[2], Evanivaldo Rivelino Medina Ruiz[3] y Calamaco Dimas Armando[4]
1, 2, 3,4 Universidad Autónoma de Nuevo león, San Nicolás de los Garza Nuevo León, México.
E-mail (corresponsal) nyraes@hotmail.com

Resumen

En el noreste de la república mexicana el desarrollo empresarial ha tenido un crecimiento muy variado desde las macroempresas trasnacionales hasta las pequeñas y medianas empresas (PYMES) de las cuales podemos mencionar que algunas de ellas han tenido cierta dificultad para integrarse a las cadenas de valor que requiere el mercado actual en la confección de prendas de vestir, por ello mediante la gestión de tecnologías (administración de tecnología) utilizando metodologías agiles, este proyecto pretende el desarrollo de un software capaz de automatizar las operaciones de la administración diarias que se llevaran a cabo en un negocio dedicado a la confección de uniformes, dentro de las características que se desean incluir se busca que sea agradable y fácil de usar para el personal, así como también que cubra las necesidades del cliente. Los resultados que se pretende obtener son: la mejora de control de información, reducción de tiempos, mejora de rendimiento de producción, control de entrada de materia prima, control de salida de producto. Es decir crear un sistema robusto que permita al cliente optimizar la toma de decisiones de negocio y con ello generar un impacto en las percepciones económicas del mismo.

Palabras clave: administración-tecnología, desarrollo-software, innovación-administrativa, gestión-tecnología

Abstract

In the Northeast of the Mexican Republic business development has had a very varied growth from transnational macro companies to small and medium enterprises (SMEs) of which we can mention that some of them have had some difficulty to integrate into the value chains that requires the current market in the manufacture of garments, therefore through technology management (technology management) using agile methodologies, this project aims to develop a software capable of automating the daily administration operations that will be carried out in a business dedicated to the the confection of uniforms, within the characteristics that wish to be included, is intended to be pleasant and easy to use for the staff, as well as to cover the needs of the client. The results that are sought are: the improvement of information control, reduction of time, improvement of production performance, input control of raw material, control of output of product. In other words, create a robust system that allows the client to optimize business decision making and thereby generate an impact on the economic perceptions of the same.

Keywords: administration-technology, software-development, administrative-innovation, management-technology

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 10, pp.107 - 126, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

1. **Introducción**

La empresa manufacturera de prendas de vestir ha generado grandes cambios a partir de la revolución industrial, con la introducción de procesos automatizados y la mejora de los procesos administrativos, dentro de este progreso empresarial dos elementos relevantes son la innovación y la gestión de tecnología pues aportan una ventaja competitiva en las organizaciones potenciando las cadenas de valor y con ello generar mayor productividad y competitividad en los mercados regionales nacionales e internacionales.

Dentro del entorno global de competencias y cadenas de valor que requiere el mercado actual en la confección de prendas de vestir en la pequeña y mediana industria (PYMES) refiriéndonos al caso de México, es imperativo la optimización de los procesos administrativos mediante la gestión tecnológica (administración de tecnologías) para lograr mejores tiempos de respuesta para responder al reto de interactuar con empresas trasnacionales exportadoras.

En el noreste de la república mexicana el desarrollo empresarial en la confección de prendas de vestir ha tenido un crecimiento muy diverso, desde las macroempresas nacionales y trasnacionales que han ido modificando sus procesos de acuerdo al crecimiento tecnológico y el desarrollo de sistemas de información, hasta las pequeñas y medianas empresas (PYMES) de las cuales podemos mencionar que algunas de ellas han tenido cierta dificultad para integrarse a las cadenas de valor que requiere el mercado actual en la confección de prendas de vestir, debido a la falta de elementos tecnológicos he informáticos que les permitan agilizar sus procesos y manejar la información de sus procesos administrativos de manera adecuada y segura con la finalidad de cumplir las expectativas y necesidades de sus clientes.

Por lo anterior, el objetivo de este proyecto fue el desarrollo de un software a través de metodologías agiles capaz de automatizar las operaciones de la administración diarias que se llevaran a cabo en un negocio de confección de uniformes que pertenece a las PYMES localizadas en el área metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México. Dentro de las características que se desean incluir se busca que sea agradable y fácil de usar para el personal, así como también que cubra las necesidades del cliente.

Los resultados que se pretende obtener son: la mejora de control de información, reducción de tiempos, mejora de rendimiento de producción, control de entrada de materia prima, control de salida de producto. Es decir crear un sistema robusto que permita al cliente optimizar la toma de decisiones de negocio y con ello generar un impacto en las percepciones económicas del mismo.

Es conveniente mencionar que este proyecto de software fue desarrollado por alumnos de sexto semestre del plan de estudios de Ingeniero Administrador y de Sistemas que se imparte en la facultad de ingeniería mecánica y eléctrica de la universidad autónoma de Nuevo León, México.

2. Marco teórico

El desarrollo de proyectos dirigido a innovar mediante gestión tecnológica presenta una gran diversidad de metodologías que sirven para gestionar el desarrollo de software, Según Tinoco G. [1] en su artículo “Criterios de selección de metodologías de desarrollo de software”, las metodologías de desarrollo se pueden agrupar en seis clasificaciones que permiten seleccionar una metodología.

Las clasificaciones son: La metodología con mayor presencia en Internet, La metodología mejor documentada, Metodologías certificadas y con training, Metodologías con comunidades, Metodologías más utilizadas por empresas (Presencia empresarial) y Metodologías más utilizada en proyectos software.

Sin embargo, debemos mencionar que dentro de estas clasificaciones existen tanto las metodologías tradicionales como las metodologías agiles y es importante identificar las diferencia entre ellas por lo cual a continuación se presentan las diferencias que existen entre ambas metodologías en la Tabla 1[2], estas diferencias influyen de manera determinante el proceso de desarrollo de software, y al mismo tiempo el entorno de iteración de los equipos y la organización.

Tabla 1. Diferencias entre metodologías ágiles y metodologías tradicionales.

Metodologías Ágiles	**Metodologías Tradicionales**
Basadas en heurísticas provenientes de prácticas de producción de código	Basadas en normas provenientes de estándares seguidos por el entorno de desarrollo
Especialmente preparados para cambios durante el proyecto	Cierta resistencia a los cambios
Impuestas internamente (por el equipo)	Impuestas externamente
Proceso menos controlado, con pocos principios	Proceso mucho más controlado, con numerosas políticas/normas
No existe contrato tradicional o al menos es bastante flexible	Existe un contrato prefijado
El cliente es parte del equipo de desarrollo	El cliente interactúa con el equipo de desarrollo mediante reuniones
Grupos pequeños (<10 integrantes) y trabajando en el mismo sitio	Grupos grandes y posiblemente distribuidos
Pocos artefactos	Más artefactos
Pocos roles	Más roles
Menos énfasis en la arquitectura del software	La arquitectura del software es esencial y se expresa mediante modelos

Dado que este proyecto se desarrolló mediante metodologías agiles (SCRUM) enfocaremos nuestra atención en estas.

En el artículo metodologías agiles en el desarrollo de software se menciona que en una reunión que se realizó en el año 2001 en Utah Estados Unidos participaron 17 expertos de la industria del desarrollo de software, los cuales definieron por primera vez el término “ágil” cuyo objetivo fue perfilar los principios y valores que deberían permitir a los equipos desarrollar software rápidamente y respondiendo a los cambios que puedan surgir a lo largo del proyecto.

Posterior a esa reunión se creó una organización sin ánimo de lucro denominada The Agile Alliance cuyo propósito fue promover los conceptos relacionados con el desarrollo ágil de software y ayudar a las organizaciones para que adopten dichos conceptos mediante el Manifiesto Ágil, en el cual se privilegian los individuos e interacciones sobre procesos y herramientas, software de trabajo sobre documentación integral, colaboración con el cliente sobre negociación de contrato y responder a los cambios sobre seguir un plan en este documento se resume la filosofía .ágil. [2]

A partir de ese episodio surgieron múltiples metodologías basadas estos principios y valores de las cuales mencionamos a continuación algunas de las más populares:

Tabla 2. Metodologías agiles

programación extrema (Extreme Programming-XP)
Método de desarrollo de sistemas dinámicos (Dynamic Systems Development Method - DSDM)
Desarrollo Adaptativo de Software (Adaptive software developmen- DASt)
Metodologías cristal (crystal methodologies)
Desarrollo orientado a funcionalidades (Feature-Driven Development - FDD)
SCRUM

A continuación se realiza una breve descripción de los métodos mencionados en la tabla anterior, dando un énfasis particular a la última metodología (SCRUM) debido a que con dicha metodología fue desarrollado el proyecto

Programación extrema (extreme programming-XP) [3] esta metodología se basa principalmente en fortalecer las relaciones y el trabajo en equipo estableciendo climas de trabajo adecuados y procurando el crecimiento laboral de los desarrolladores, para lograr con éxito el desarrollo de software. Esta metodología ágil se apoya principalmente en la retroalimentación continua con el cliente, canales de comunicación adecuados entre el equipo participante, implementación de soluciones simples y valor para enfrentar los cambios.

Método de desarrollo de sistemas dinámicos (Dynamic Systems Development Method-DSDM) [4] La idea elemental del método es establecer el tiempo y los recursos y después adaptar la funcionalidad en consecuencia. La versión inicial del método se desarrolló en 1994, y su inicio fue originado por la necesidad en el desarrollo rápido de aplicaciones

Desarrollo Adaptativo de Software (Adaptive software development) [5] esta metodología impulsa un modelo adaptativo para el desarrollo de software que permite dar solución a sistemas grandes y complicados, las etapas principales de esta metodología son: deducción colaboración y aprendizaje, en la primera etapa se establecen las características del software, la segunda etapa consiste en desarrollar las características del proyecto y en la tercera etapa se inspecciona la calidad para detectar errores corregirlos y reiniciar el ciclo de desarrollo al ser liberado de esta etapa se entrega al cliente

Las metodologías cristal (Crystal Mhetodologies)[6] fueron desarrolladas por Alistair Cockburn, y su nombre es atribuido a las caras de una gema, cada cara representa otra versión del proceso, y cada una de ellas se ubican alrededor de un mismo núcleo. En esta metodología se crea una distribución por colores con relación al peso de cada proyecto y al número de miembros del equipo, así, Crystal Clear se denomina a equipos de 3 a 8 personas, Crystal Yellow en equipos de 10 a 20 personas, Crystal Orange en equipos de 25 a 50 personas y así de manera sucesiva hasta llegar al último nivel que es de 800 personas o más y se denomina Crystal blue. Una de sus características principales es centrarse en las personas que componen el equipo (ya que de ellas depende el éxito del proyecto) y disminuir al máximo el número de artefactos generados. Promueve mejorar las habilidades de los miembros del equipo para definir políticas de trabajo. Las principales características de esta metodología se presentan en la tabla a continuación:

Tabla 3. Características de las metodologías cristal

Entregas de software a los clientes con frecuencia	Retroalimentación constante
Comunicación continua (se recomienda la iteración cara a cara)	Seguridad
Enfoque	Acceso a usuarios
Ambiente técnico con pruebas automatizadas	Administración de configuración e integración frecuente

Desarrollo basado en características (Feature-Driven Development FDD) tiene como atributo principal la planeación y el diseño anticipado, como derivado de esto, el modelo de objetos, la lista de características y la planificación se realizan al comenzar el proyecto. Cinco fases integran su ciclo de vida estas son la construcción de un modelo integral, planificación, desarrollo, diseño y la construcción en base a características [7]

SCRUM [9]. Esta metodología fue desarrollada por Ken Schwaber, Jeff Sutherland y Mike Beedle. Aplicada con éxito durante los últimos años, establece un escenario para la gestión de proyectos, se sugiere su uso principalmente para proyectos con un rápido cambio de requisitos Sus principales características se pueden resumir en dos. El desarrollo de software se realiza mediante iteraciones, denominadas Sprint, con una duración de 30 días. El resultado de cada sprint es un incremento ejecutable que se muestra al cliente. La segunda característica importante son las reuniones a lo largo proyecto, entre ellas destaca la reunión diaria de 15 minutos del equipo de desarrollo para coordinación e integración.

Su nombre corresponde a un concepto deportivo, perteneciente al rugby, relacionado con la formación requerida para la recuperación rápida del juego ante una infracción menor [10]. En 1986 Takeuchi y Nonaka emplean un nuevo planteamiento para desarrollar productos utilizando el Rugby Approach, enfocado a incrementar su flexibilidad y rapidez, a partir de la integración de un equipo interdisciplinario y múltiples fases que se traslapan entre sí [11].

Es esta metodología se manejan tres roles principales, Product owner (PO), Scrum master (SM), Development team (DT). El PO es el encargado de determinar el valor de las historias y determinar qué historia se realiza, el Scrum master promueve la creación de equipos de alto desempeño y generan el cambio ágil en la organización, aunque su enfoque primordial es el proceso y deben contar con un alto grado de inteligencia emocional. El DT es un grupo de personas multifuncionales cien por ciento dedicadas al equipo de trabajo, de preferencia este equipo debe ser pequeño (aproximadamente entre 5 y 7 personas) dado que esto facilita la comunicación para el desarrollo del proyecto

A continuación trataremos de definir algunos de los términos empleados en la metodología Scrum: [12]

Historia de usuario: describe de manera breve una funcionalidad que debe integrar un sistema de software, y su implementación proporciona valor al cliente, una historia está estructurada por:

- ✓ Nombre (breve y descriptivo)
- ✓ Descripción de la funcionalidad que se quiere generar.
- ✓ Criterio de aprobación y certificación para dar por concluido y aceptable por el cliente el desarrollo de la funcionalidad

Sprint: se refiere al intervalo de tiempo entre dos y cuatro semana en donde se desarrolla el producto potencialmente entregable, es decir un mini proyecto en donde el equipo de desarrollo enfoca su empeño en el objetivo definido en la reunión de planeación sprint.

Definition of Done (Definición de hecho en español): es vital para un equipo de desarrollo scrum . El DoD propulsa la calidad del trabajo y se emplea para valorar cuándo se ha completado una historia de usuario, además, asegura la transparencia y la calidad.

Reunión diaria de scrum: tiene una duración de 15 minutos, el equipo de desarrollo la utiliza para sincronizar las actividades que se están realizando en el sprint y planear las actividades de las siguientes 24 horas

Backlog del Producto (o "backlog"): contiene los requerimientos del sistema, expresados como una lista priorizada de elementos del backlog del producto. Esto incluye requerimientos del cliente funcionales y no-funcionales, y también requerimientos técnicos generados por el equipo.

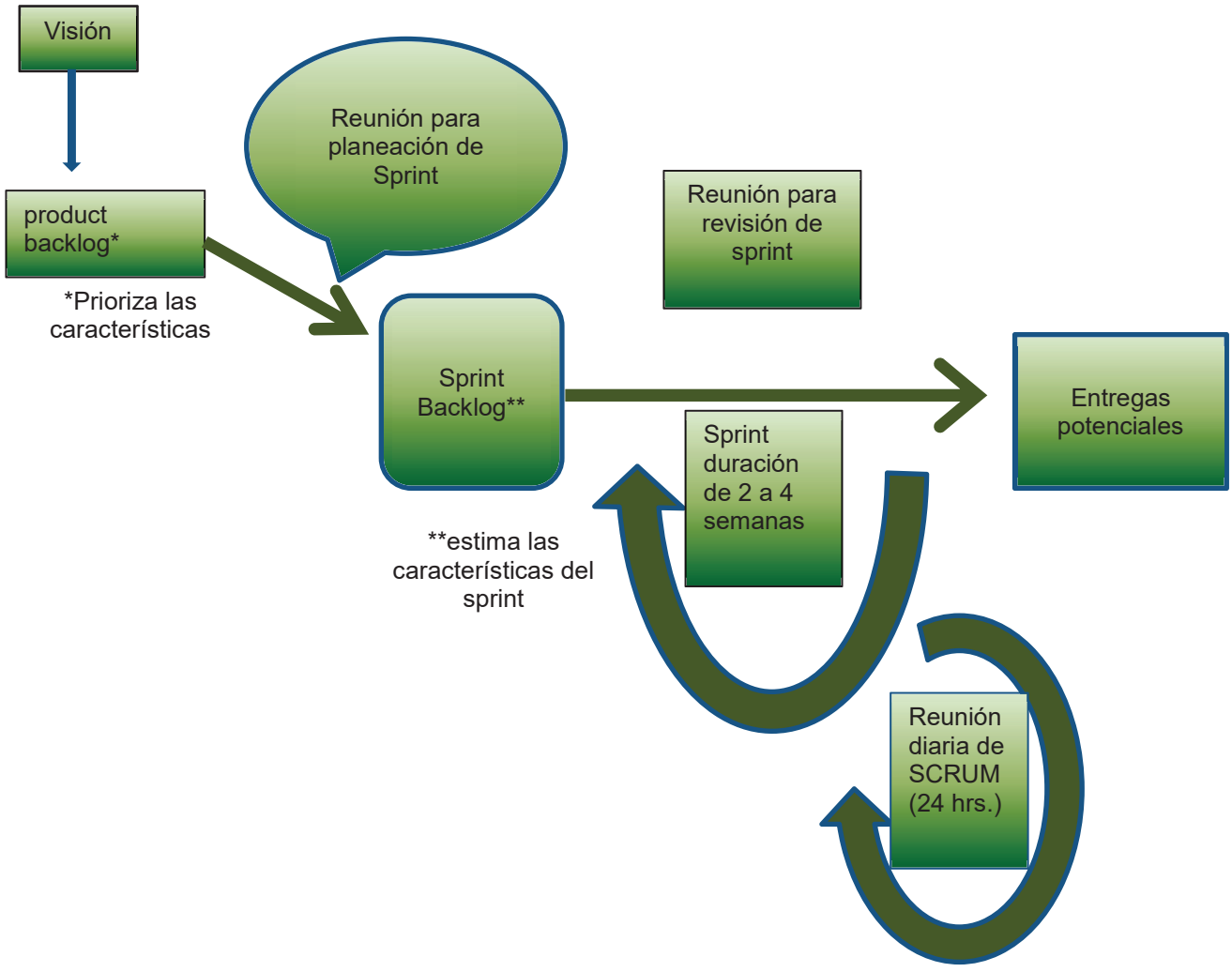


Figura 1 El ambiente Scrum

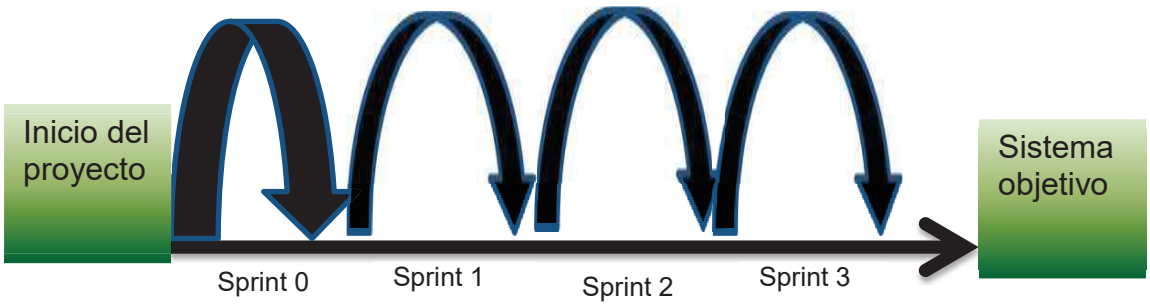


Figura 2 ciclo de entrega ágil

A continuación enumeraremos algunas frases interesantes en Scrum:

1. - “we can´t predict the future, therefore, we plan as we go” [13]

2. - “we must learn what’s customers really want, not what they say they want or what we think they should want” [14]

3. - “It may look like it sometimes. But I am not the captain of this ship” (scrum master) [13]

4. - "Scrum is like your mother-in-law, "It's constantly pointing out your shortcomings. [15]

5. – “Decimos que algo está hecho cuando nadie más debe preocuparse por eso” [16]

3. Metodología

Como parte inicial de este proyecto se buscó información pertinente sobre el tema, posteriormente se analizó dicha información y en base a ella re realizo una reunión inicial donde se establecieron en conjunto con el cliente los siguientes requisitos:

- . Permitir al cliente una toma más eficiente de decisiones reduciendo el tiempo en la disponibilidad de información.
- Realizar una administración más precisa de inventarios tanto de materias primas como de producto terminado controlado mediante el sistema el ingreso de materias primas, la salida de producto terminado y los conceptos monetarios de los mismos.

Con lo anterior se realizó el diseño del sistema de la siguiente manera: Este proyecto estará compuesto por 6 interfaces, cada interfaz contara con una función en específico:

Primera será el menú de inicio donde nos mostrara un botón para poder entrar a las interfaces y cuenta con diversos niveles de usuario dependiendo de la información requerida por cada uno.

Segunda interfaz es la pantalla principal del sistema que permite el acceso a las siguientes pantallas o interfaces.

Tercera interfaz pertenece al registro de productos que se van confeccionando.

Cuarta interfaz es de materias primas donde se registran las altas y bajas de las materias primas que entran al negocio.

Quinta interfaz pertenece a proveedores donde se lleva el control de los proveedores que entran y salen y lo que están aportando.

Sexta interfaz es el registro de clientes, donde se dará de alta al cliente otorgándole un numero conforme va solicitando el pedido. Este sistema fue desarrollado utilizando:

Figura 3 Materiales

4. Resultados

A continuación se muestran las diversas interfaces desarrolladas y una breve descripción de sus funciones:

Esta interfaz es para el acceso al sistema cuenta con diferentes niveles de usuario dependiendo del nivel de información a la cual tenga acceso.

Figura 4 menú de ingreso al sistema

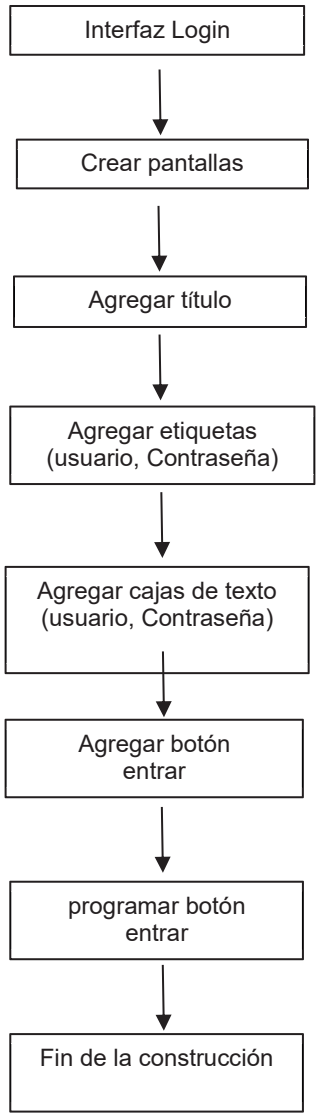


Figura 5 diagrama de flujo menú de ingreso

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 10, pp.107 - 126, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

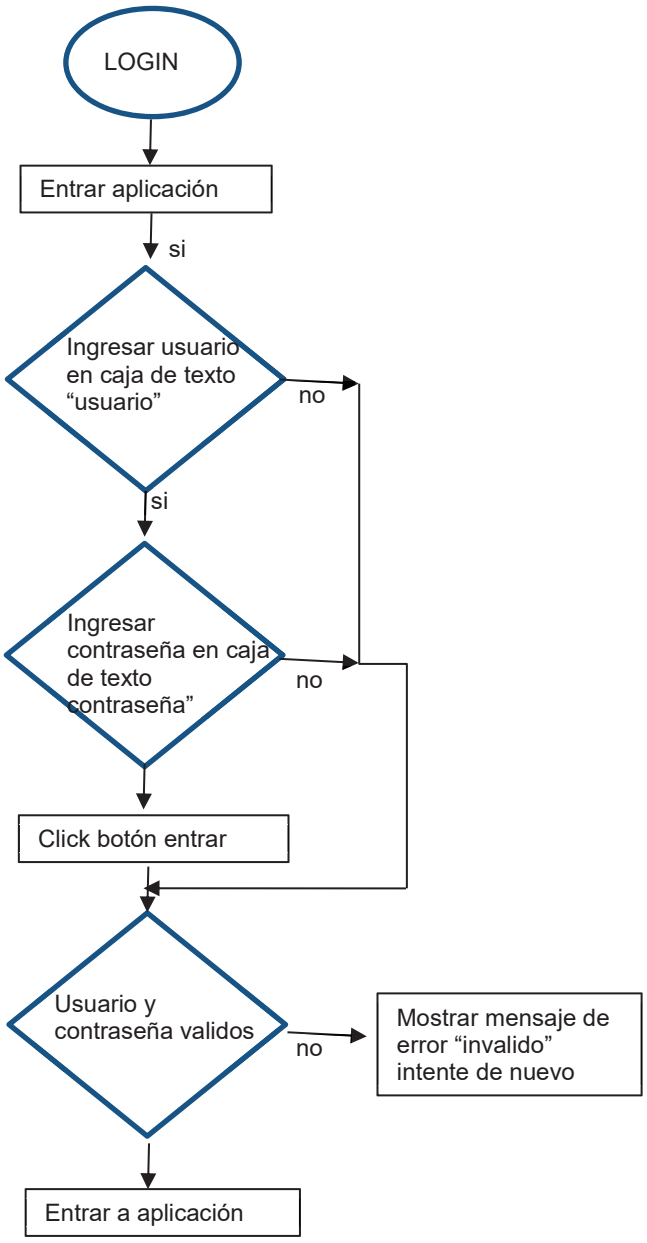


Figura 6 diagrama de flujo de funcionalidad

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 10, pp.107 - 126, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Interfaz 2. Muestra todas las funciones del sistema, así mismo cuenta también con la opción de salir por completo del software y poder retroceder nuevamente al menú de ingreso al sistema.

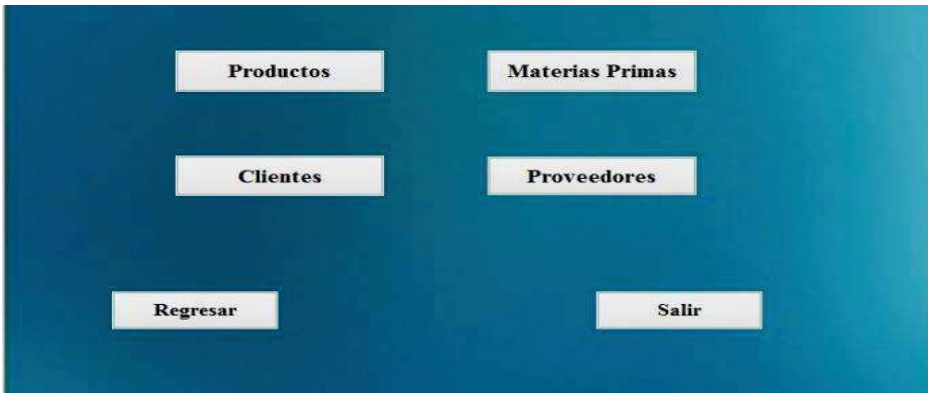


Figura 7 pantalla principal

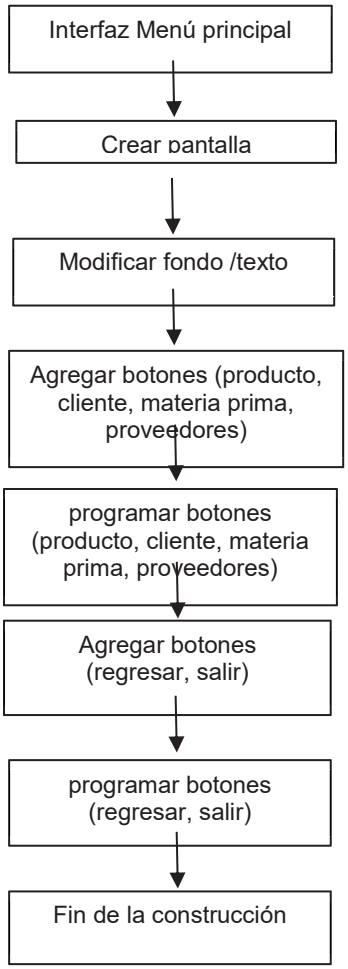


Figura 8 diagrama de flujo de construcción

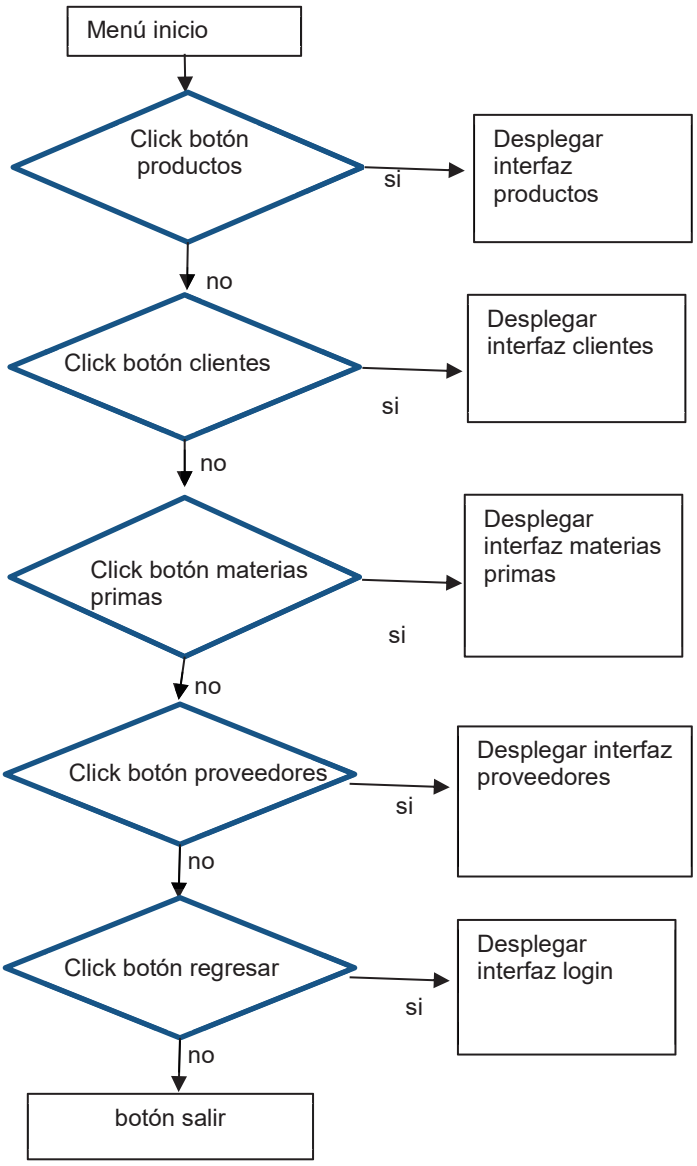


Figura 9 diagrama de flujo de funcionalidad

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 10, pp.107 - 126, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Interfaz 3. Pertenece al producto terminado En esta pantalla, el administrador llevará el registro y control de los pedidos que se le han solicitado.

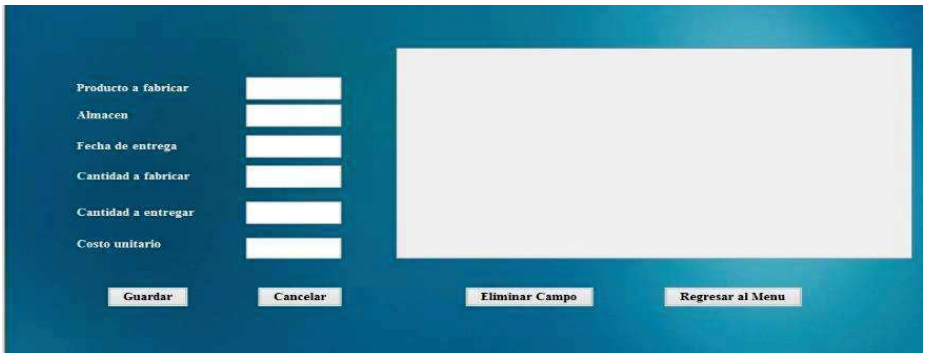


Figura 10 producto terminado

Interfaz 4. permite el registro de los insumos para la elaboración de prendas de vestir y la cantidad en metros cuadrados de las fibras sintéticas de las mismas que entran al local y cuál es el proveedor de estas.

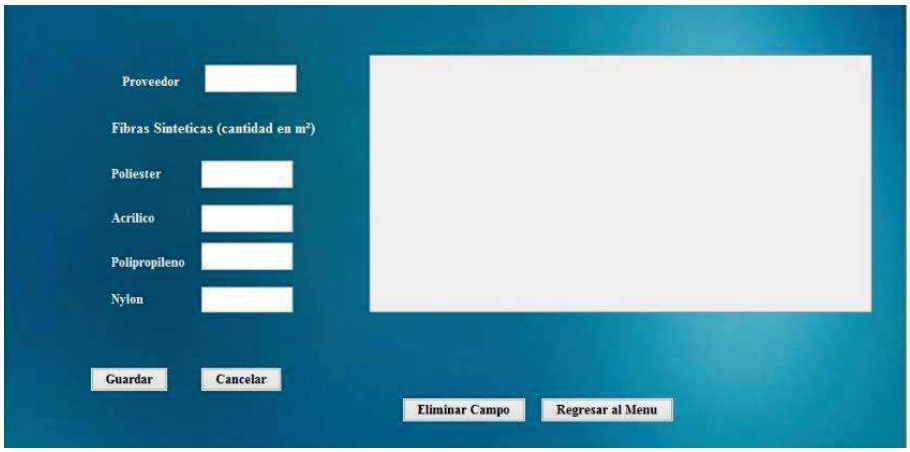


Figura 11 materia prima

Interfaz cinco permite el registro de clientes y se realiza un control de estos mediante numeración secuencial para controlar de manera adecuada el orden de los pedidos que se han solicitado.

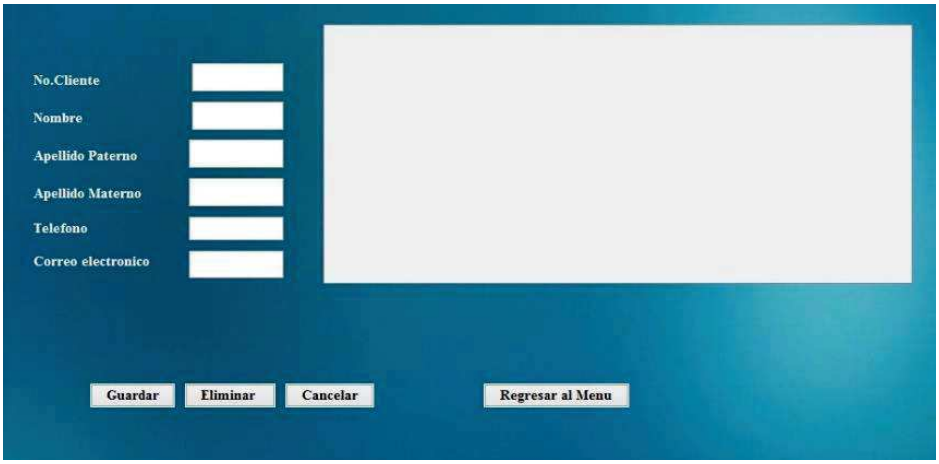


Figura 12 registro de clientes

Interfaz 6. Proveedores
Se registran todos los proveedores con sus datos de contacto

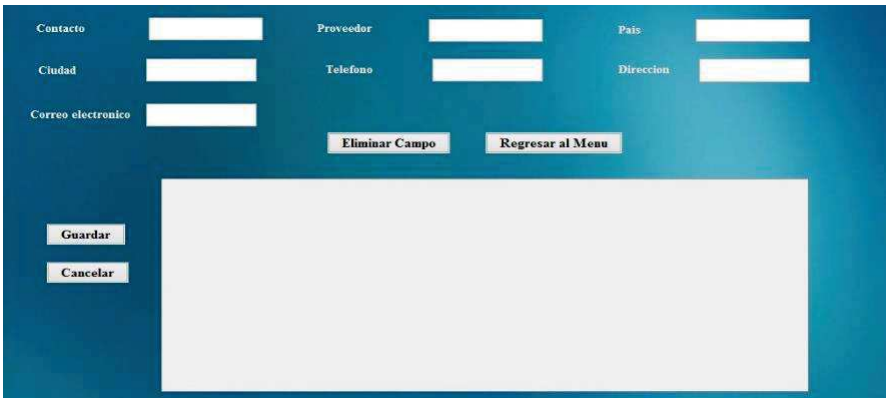


Figura 13 registro de proveedores

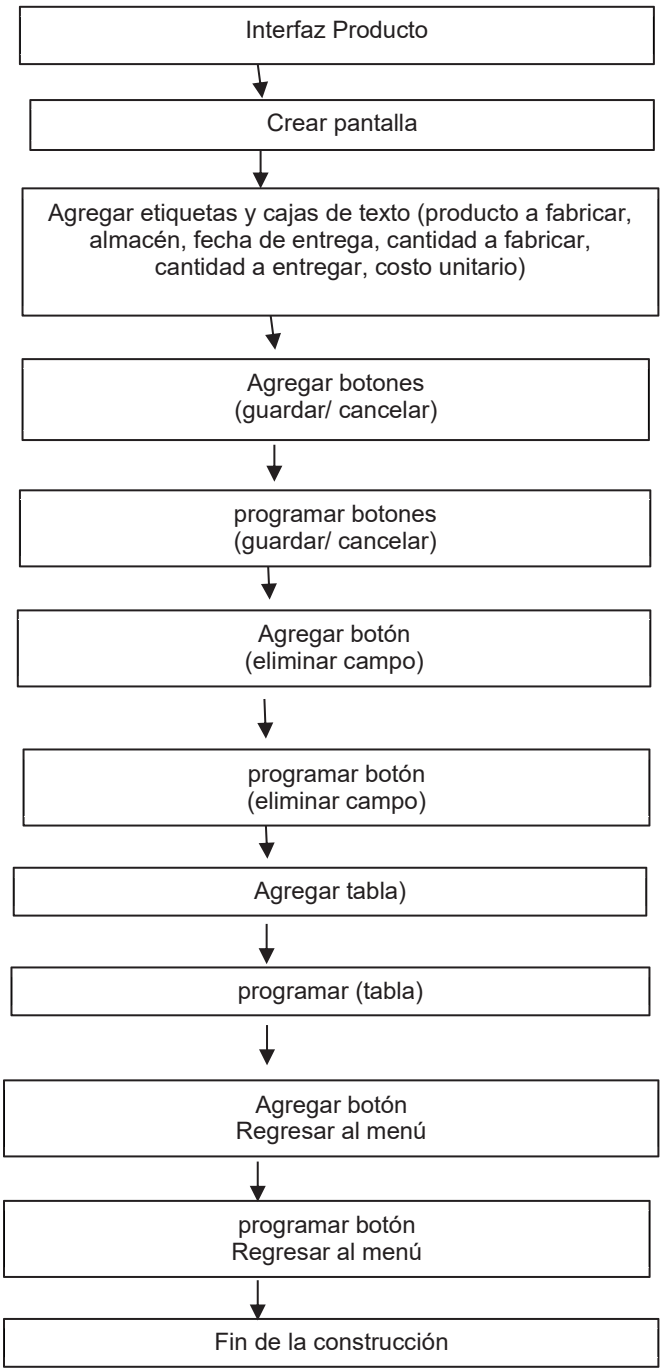


Figura 14 diagrama de flujo de producto

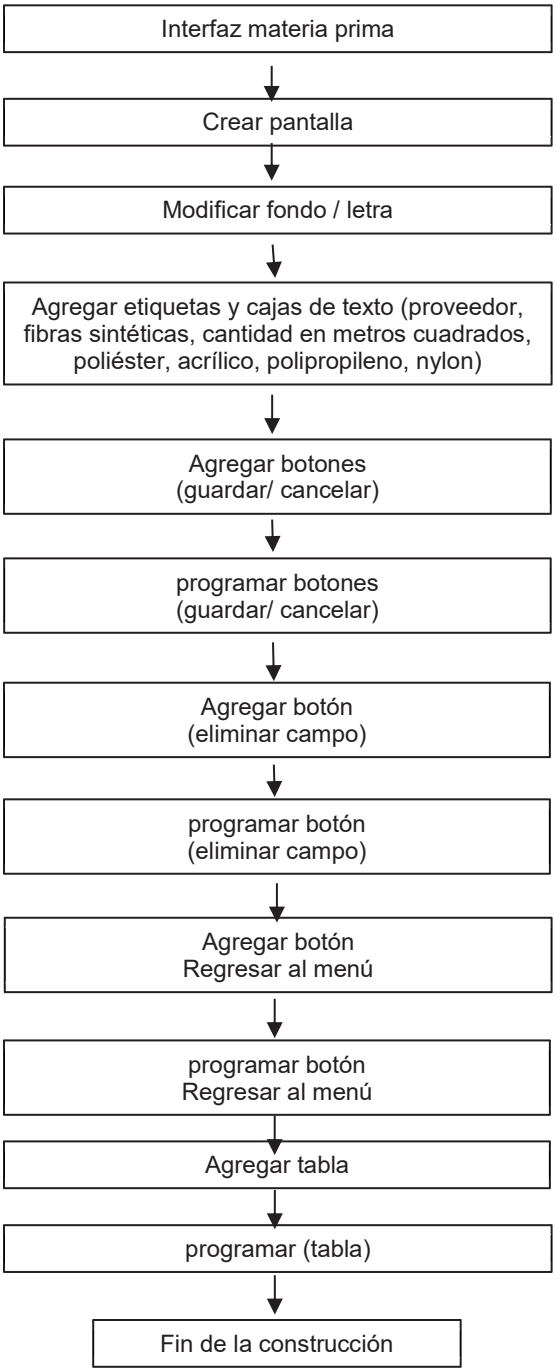


Figura 15 diagrama de flujo de materia prima

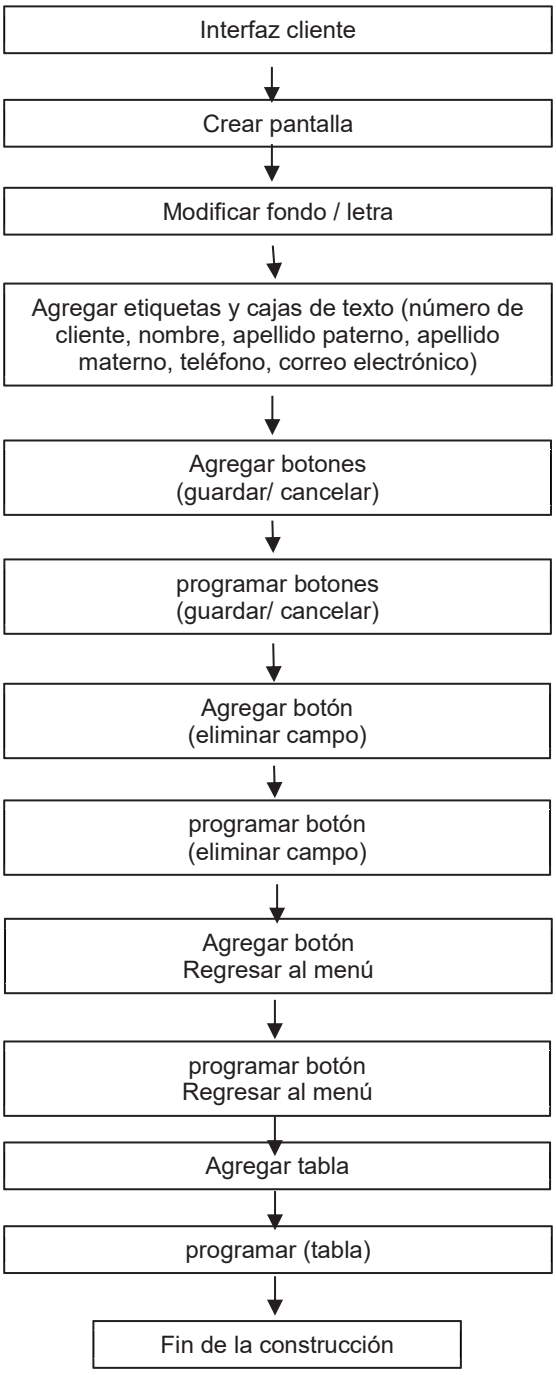


Figura 16 diagrama de flujo de cliente

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 10, pp.107 - 126, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

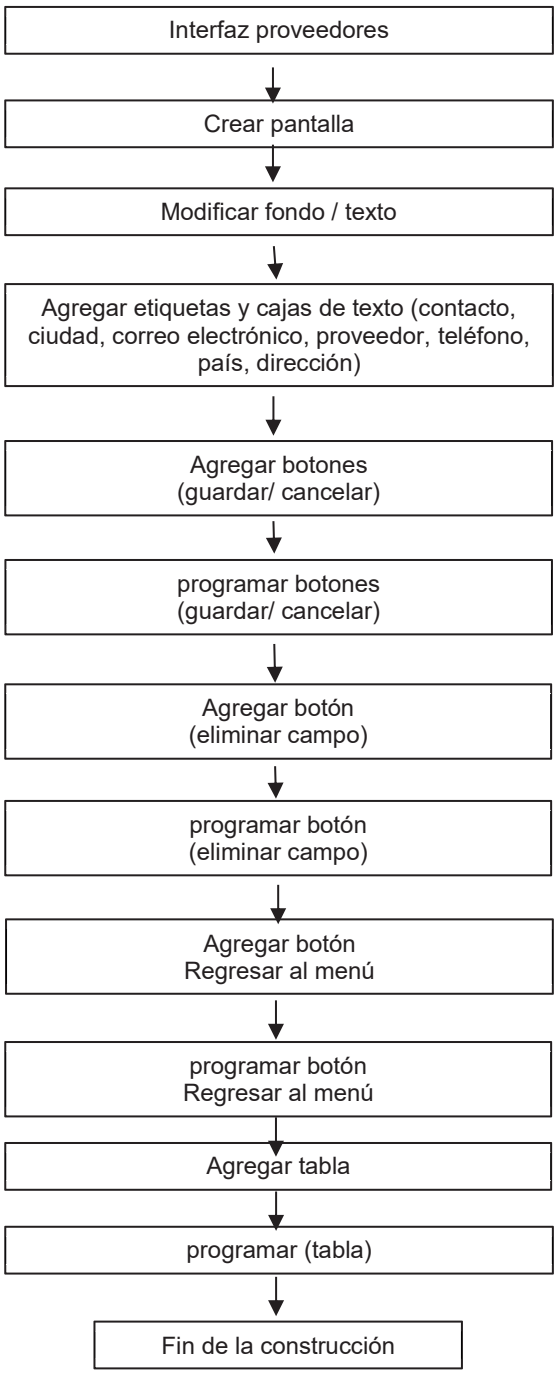


Figura 17 diagrama de flujo de proveedor

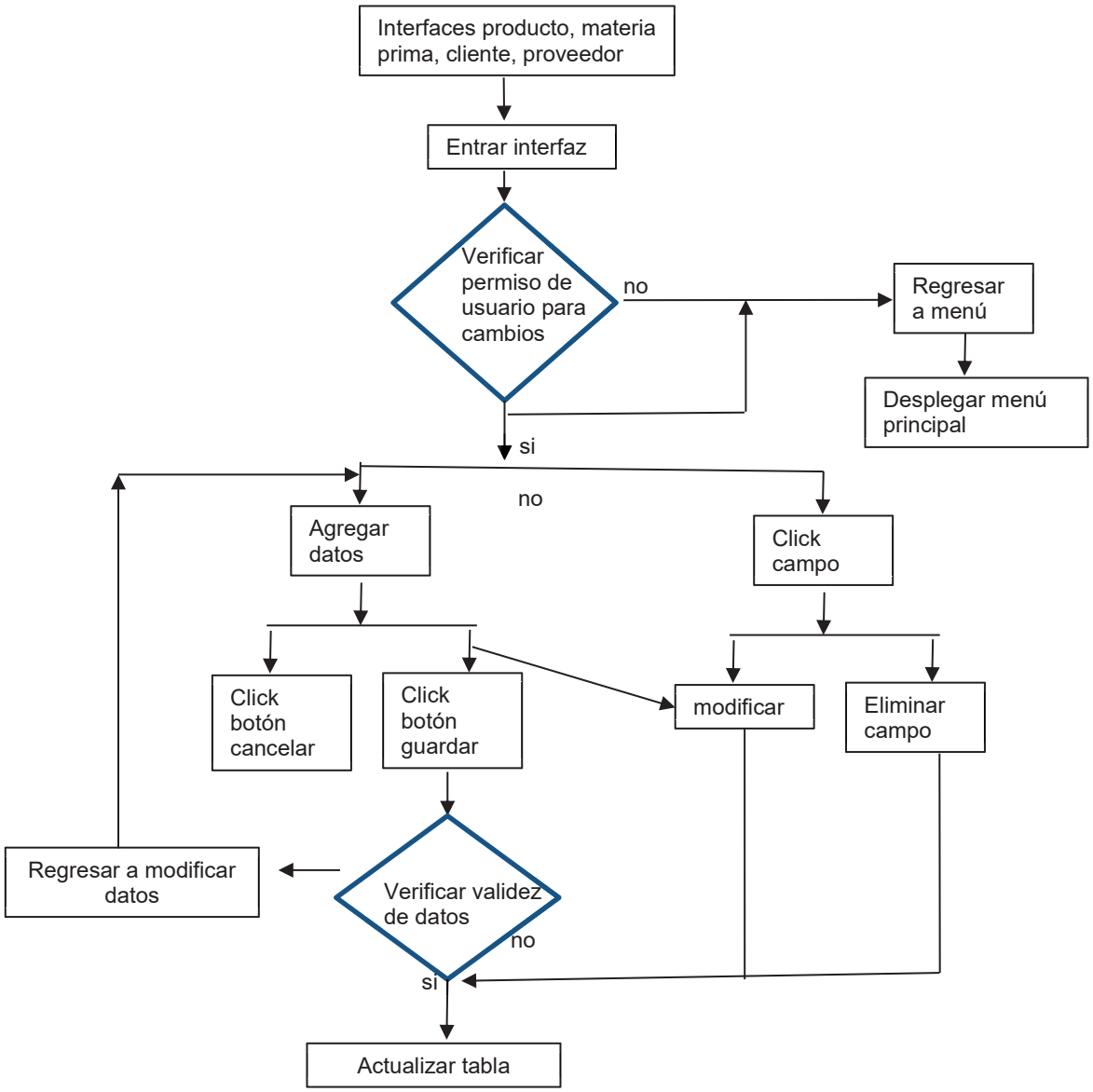


Figura 18 diagrama de flujo de funcionalidad

5. Conclusiones

La realización del proyecto permitió cumplir los objetivos del mismo que son: la mejora de control de información, reducción de tiempos, mejora de rendimiento de producción, control de entrada de materia prima, control de salida de producto. Es decir se creó sistema robusto que permita al cliente optimizar la toma de decisiones de negocio y con ello generar un impacto en las percepciones económicas del mismo. En etapas posteriores se pretende desarrollar nuevas interfaces para cubrir con ellas el aspecto de negocios y control de personal

Referencias

[1] Tinoco Gómez, O., & Rosales López, P., & Salas Bacalla, J. (2010). *Criterios de selección de metodologías de desarrollo de software*. *Industrial Data, 13* (2), 70-74.

[2] Canos, J. Patricio Letelier y Mª Carmen (2005). *Metodologías Ágiles en el Desarrollo de Software*. Universidad Politécnica de Valencia.

[3] Beck, K.. .*Extreme Programming Explained. Embrace Change*., Pearson Education, 1999. Traducido al español como: .*Una explicación de la programación extrema. Aceptar el cambio*., Addison Wesley, 2000.

[4] DSDM *Consortium, Dynamic Systems Development Method, version 3*. Ashford, Eng.: DSDM Consortium, 1997.

[5] Highsmith, J. A. *Adaptive Software Development: A Collaborative Approach to Managing Complex Systems*. New York, NY: Dorset House Publishing, 2000.

[6] Cockburn, A. *Agile software development*. Addison Wesley, Reading, 2001.

[7] Palmer, S. R., & Felising, J. M. *A practical guide to feature-driven devolpment*. Pearson, Indianapolis, 2002.

[8] Scrum Alliance (2012, marsh 28). Scrum: the basics [Internet], Disponible desde http://www.scrumalliance.org/pages/what_is_scrum [Acceso Abril 8, 2019].

[9] Schwaber K., Beedle M., Martin R.C. .*Agile Software Development with SCRUM*.. Prentice Hall. 2001.

[10] International Rugby Board (2012, mayo 15). Ley 20, Scrum. En Leyes del juego de Rugby [Internet], Disponible desde http://www.irblaws.com [Acceso abril 8 2019].

[11] Takeuchi, H. & Nonaka, I. *The new product development game*. Harvard Business Review, Ene-Feb, 137-146, 1986.

[12] Schwaber, K. & Sutherland, J. (2011). *The Scrum guide* [Internet], Disponible desde http://www.scrumguides.org [Acceso Abril 8, 2019].

[13] La escuché en una sesión de trabajo y la he visto en algunos libros

[14] 20 frases para construir un startup exitosa disponible desde https://www.entrepreneur.com/article/267822 [acceso 12 de abril 2019]

[15] Shore, James. The Decline and Fall of Agile. http://www.jamesshore.com/Blog/The-Decline-and-Fall-of-Agile.html [Acceso abril 12, 2019].

[16] Cyment, Alan. El espíritu de Scrum, El arte de amar los lunes. V0.2 – disponible en http://es.scribd.com/doc/84799747/El-espiritu-de-Scrum [Acceso abril 12, 2019].

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 11, pp.127 - 143, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Diseño de Sistema Robótico Semiautónomo para Monitoreo de Calidad del Agua Superficial

Córdoba Malaver Ana Rocío[1], Gamboa Contreras Wilson[2], Castillo Castañeda Eduardo[3] y Benítez Muñoz Sandra Johana[4]

Instituto Politécnico Nacional – IPN, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Querétaro, México [1,3]
Fundación Universitaria de San Gil - UNISANGIL, Grupo de Innovación y Desarrollo Tecnológico de Unisangil - IDENTUS, San Gil, Santander, Colombia [1,2,4]
E-mail: anarcordobam@gmail.com[1]

Resumen

El presente artículo, comprende la descripción de la actividad de medición, materiales y métodos usualmente empleados para la obtención y análisis de calidad de agua superficial. Dichos parámetros se obtienen empleando protocolos de monitoreo manuales para análisis de calidad del agua in situ y otras son llevadas a laboratorio. Los desarrollos tecnológicos como, robots y vehículos aéreos no tripulados aportan una solución a esta problemática actual. Se desarrolló un diseño asistido por computador (CAD) de un sistema robótico que cumple con los requerimientos para llevar a cabo el procedimiento de monitoreo de calidad del agua superficial. El diseño comprende: actuador para toma de muestras por medio de un brazo robótico, dispositivo de traslado y conservación de muestras, sistema de instrumentación de análisis in-situ, dispositivo de reconocimiento panorámico, georeferenciación y sistema de comunicación y transferencia de información. La integración del desarrollo tecnológico se modeló matemáticamente en Matlab y estructuralmente en Solidwords.

Palabras clave: Calidad del agua superficial, Sistemas de monitoreo del agua superficial, Sistemas Robotizados.

1. Introducción

Para la determinación de la calidad del agua superficial de las fuentes hídricas, se realizan salidas de campo basadas en métodos típicos para monitoreo obteniendo de forma manual las muestras portables, de las cuales se logra obtener por medio de sondas, resultados de variables para análisis de calidad del agua in situ y otras son llevadas a laboratorio. Los elementos para el procesamiento y determinación de la calidad de agua pueden clasificarse en tres categorías: cintas reactivas, Kits de discos de colores e Instrumentos digitales portátiles. Los procedimientos que se siguen para la toma de muestras y su análisis están basados en parámetros establecidos por las normas y protocolos para monitoreo de calidad del agua y, de acuerdo con el tipo de recurso hídrico de estudio. A su vez, existe la necesidad y obligación del ser humano para con el planeta de "organizar y mantener un sistema de información ambiental, con los datos físicos, económicos, sociales, legales, y en general, concernientes a los recursos naturales renovables y al medio ambiente" [1].

Los protocolos de monitoreo del agua superficial en la actualidad emplean métodos manuales, tal y como se observa en la Figura 1 la persona que toma las muestras de agua debe ubicarse ya sea sobre un puente, una barca, entrar en contacto directo con el agua o realizar maniobras de equilibrio sobre ella para realizar la toma, siendo esto un riesgo para quien efectúa dicha labor. El procedimiento a grandes rasgos consiste en introducir en el cuerpo hídrico el recipiente generalmente de vidrio o plástico debidamente esterilizado entre 15cm a 30cm de profundidad y se mantiene allí hasta que está

lleno, manteniendo en ese proceso una ubicación adecuada de la botella evitando tener tanto: recirculación del agua en el interior del recipiente, como estar en contacto con el agua que entra al recipiente; luego se retira, se etiqueta y sella el recipiente. Seguido a esto, se procede a hacer el análisis de la muestra in situ, dependiendo de las variables que se desean medir, en algunos casos es necesario adicionar a la muestra uno o varios reactivos para su análisis. Generalmente, para el monitoreo de calidad de agua superficial se identifican variables como: Temperatura (ºC), Conductividad eléctrica (µS/m), Oxígeno Disuelto (mg/l), pH, Sólidos Disueltos Totales (mg/l), Turbiedad (UNT), Nitritos y Nitratos; variables que en su mayoría pueden ser obtenidas in situ.

Figura 1. Posicionamiento in situ para toma de muestras de agua superficial.
Fuente: Servicios Analíticos Generales S.A.C. (SAG), Autoridad Nacional del Agua (ANA-MDD), Oficina Técnica Nacional (OTN-PB), Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

Luego, la persona encargada de dicha labor registra los datos arrojados por los elementos de medición de forma manual en libretas de campo o formatos de captura de datos. En el caso que se requiera el análisis de muestras en laboratorio, éstas son almacenadas en neveras y transportadas hasta allí. Finalmente, la persona hace un reconocimiento visual del lugar de la toma, desplazándose algunos metros por la orilla de la fuente hídrica para identificar si existen agentes externos que puedan interferir con los niveles adecuados en la calidad del agua; si se observa la presencia de alguno, se hace la anotación del evento en la libreta de campo. Una vez realizada dicha labor, los datos son transcritos en planillas digitales para su almacenamiento, procesamiento y análisis. A su vez, se redacta el reporte de monitoreo de calidad del agua superficial y se conserva el registro [2].

Basados en el procedimiento para monitoreo y análisis de calidad de agua superficial del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y los instrumentos empleados para realizar esta labor, se observan tres grandes problemas: el primero está relacionado con el riesgo al que se encuentra sometida la persona que realiza la toma de la muestra, el segundo está ligado al proceso de reconocimiento visual del lugar y el tercero está relacionado con el proceso de registro de los datos obtenidos.

No se cuenta con un sistema integral que permita la captura de la muestra de agua, la obtención de las variables para monitoreo de la calidad, el registro y almacenamiento digital y confiable de los datos, el reconocimiento visual y registro de variables contaminantes o perturbadoras de la calidad del agua; que permita el análisis y entrega de informes y resultados en un corto tiempo, de forma sistémica y con información confiable y, sin poner en riesgo la integridad del ser humano [3-4]. Por tal motivo, surge la necesidad de desarrollar un proyecto con el cual se pueda dar solución a los tres aspectos anteriormente mencionados.

El presente artículo, comprende la descripción de la actividad de monitoreo de calidad del agua superficial, los materiales y equipos usualmente empleados para la obtención y análisis de las muestras, los desarrollos más relevantes actualmente existentes y el diseño asistido por computadora (CAD) o propuesta del sistema robótico con el que se quiere contribuir en este campo de trabajo, aportando una solución a esta problemática actual.

2. Monitoreo de calidad de agua superficial

El monitoreo de calidad de agua superficial “es fundamental para evaluar las condiciones y el estado de diferentes cuerpos de agua” [2] y comprende tres actividades generales: la recolección de la muestra de agua, la medición de variables de calidad de agua y el registro y análisis de los datos. Para cada una de estas actividades existen procedimientos a seguir para obtener un resultado confiable del estado del recurso hídrico que se esté analizando.

2.1 *Recolección de muestra de agua superficial*

El adecuado muestreo del cuerpo hídrico depende de:

- la identificación del sitio de muestreo, esto preferentemente debe ser realizado por un técnico experto en el procedimiento, quien determinará la necesidad de obtención de los datos de acuerdo a la evaluación de las necesidades de uso, o a la evaluación de las influencias sobre la calidad;
- el tipo de muestra a recolectar, ya que ésta puede ser puntual (es una muestra representativa del sitio en un tiempo determinado y suele tomarse cuando el comportamiento y composición del líquido tiende a ser invariante), compuesta (es la mezcla de varias muestras puntuales de un mismo sitio en periodos programados) o integrada (es la mezcla de varias muestras puntuales de diferentes puntos tomadas simultáneamente);
- la esterilización de los recipientes en donde se recogerá la muestra y su adecuado transporte;
- la técnica de recolección de la muestra, la cual debe realizarse de modo que no haya recirculación del flujo en el interior del recipiente, se evite el ingreso de impurezas o material de arrastre y el líquido que ingresa al recipiente no haya tenido contacto previo con el medio de sujeción del recipiente;
- y, el método de preservación de la muestra, para ello se emplean diversos reactivos de preservación de acuerdo con el tipo de variable a medir y el tamaño de la muestra.

2.2 *Medición de variables para monitoreo del agua*

La medición de variables para monitoreo del agua debe realizarse de acuerdo al tipo de variable a medir y al sensor que se emplee. Inicialmente, la muestra de agua debe haber sido envasada de forma correcta y su recipiente tapado hasta el momento en que se proceda a hacer la medición, lo anterior con el fin de evitar el ingreso de agentes externos a la muestra y pueda provocar alteraciones en los resultados (contaminación de la muestra). Los parámetros comúnmente analizados en el monitoreo de calidad del agua son los que se encuentran en la Tabla 1 y de acuerdo a los objetivos del monitoreo se seleccionan las variables más pertinentes para ello ya que en todo análisis no se encuentra necesario realizar la medición de todos los parámetros.

Tabla 1. Parámetros básicos recomendados para el monitoreo de calidad del agua [2].

Parámetros	Variables
Variables in situ	Temperatura, Conductividad eléctrica, Oxígeno disuelto, Porcentaje de saturación de oxígeno, pH.
Físicos	Sólidos suspendidos totales, Sólidos disueltos totales, Turbidez.
Nutrientes	Nitrato, Nitrito, Nitrógeno amoniacal, Nitrógeno total, Nitrógeno total Kjeldahl, Fósforo total.
Materia orgánica	Demanda bioquímica de oxígeno, Demanda química de oxígeno.
Microbiológicos	Coliformes fecales, Coliformes totales.

De conformidad con la normatividad existente para el monitoreo de la calidad del agua superficial [1-2] y [5] y de acuerdo con las variables a medir según los intereses del estudio, se debe tener en cuenta la lista básica de materiales y equipos para su uso, los cuales deben estar relacionados a una lista de chequeo y corresponder a los parámetros a determinar.

2.3 *Registro y análisis de los datos*

Mediante la observación que se hace del resultado arrojado por la sonda o sensor empleado, se ingresa el dato en los formatos para su registro, hasta recolectar toda la información necesaria. En el caso de los parámetros in situ, la lectura y registro de los valores debe ser de forma inmediata luego de ser tomada la muestra, puesto que el valor puede variar durante el almacenamiento. [5] Una vez terminado el análisis de la muestra en campo y/o en laboratorio, la información obtenida se transcribe a hojas de cálculo para realizar el análisis y conocer el estado del recurso hídrico.

2.4 Desarrollos más relevantes empleados en monitoreos de calidad del agua

A nivel mundial se ha venido realizando tareas de monitoreo de calidad de agua haciendo uso de diversos dispositivos que han sido adaptados a las necesidades particulares de quien los requiere. Los proyectos y dispositivos que están más acordes a la propuesta que se tiene y han sido tenidos en cuenta para el diseño propuesto, son los siguientes:

"OriginalWireless sensor networks: A survey on monitoring water quality" es un trabajo realizado por Pule et al. en 2017, en el que por medio de la instalación de una red de sensores -que son relativamente asequibles, permiten que las mediciones se tomen de forma remota, en tiempo real y con una intervención humana mínima- se logra analizar la calidad del agua (ver Figura 2). Ésta consta de mínimo dos componentes principales, el nodo el cual es responsable de medir los parámetros asociados con una aplicación particular y la estación base que es responsable de capturar y proporcionar acceso a todos los datos de medición de los nodos [6].

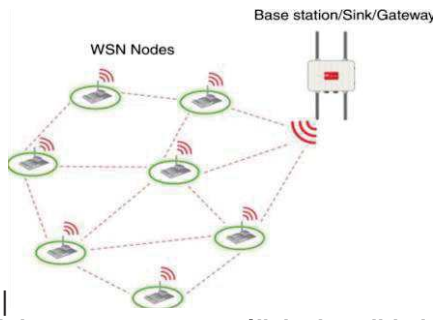


Figura 2. Red de sensores para análisis de calidad del agua [6].

El barco de levantamiento hidrográfico Oceanscience Z-Boat 1800, “robo” controlado por GNSS y con IMU que se observa en la Figura 3, cuenta con alto rendimiento en velocidad de desplazamiento y muestreo. Puede recopilar información por sonda batimétrica de simple o doble frecuencia, imágenes de barrido lateral, calidad del agua o datos de velocidad ADCP [7]. El Z-boat para su funcionamiento es cargado desde una computadora portátil desde la orilla, con la ruta a seguir mediante un sistema de radiomodem, y una vez que comienza el levantamiento, el Z-Boat funciona de forma independiente. Los datos se transmiten a la orilla y se graban simultáneamente en su interior. Posee modo automático y control manual por medio de un controlador de mano estilo "Xbox".

Figura 3. Z-Boat 1800 [7].

Al igual que el Z-Boat, UPA boat es un dron acuático y fue construido con materiales a bajo costo y como se muestra en la Figura 4 puede navegar de manera autónoma sobre la superficie del agua. Su función es analizar el comportamiento hidrodinámico de plantas de tratamiento de aguas residuales del país, lo que permitirá mejorar el diseño y eficiencia de las mismas, disminuyendo así el impacto ambiental de sus efluentes. Cuenta con una unidad central procesadora en donde se conectan los sensores externos: magnetómetros, filmadores, GPS y otros sensores [8].

Figura 4. UPA boat [8].

Para [9] fue de vital importancia el uso de un AUV (Vehículo Submarino Autónomo) en su trabajo de investigación para el análisis de las aguas del océano y el subsuelo bajo. Los AUV están basados en dos tipos de vehículos: (a) vehículos tipo crucero de forma cilíndrica alargada, optimizados para largos desplazamientos [10] y (b) vehículos de alta capacidad de maniobra equipados con manipuladores para misiones de intervención (I-AUV) [11]). El equipo diseñado por [9] cuenta con un autopiloto, encargado de mantener el rumbo y la profundidad durante el cumplimiento de misiones; es un vehículo de forma cilindro-cónica alargada (Ver Figura 5). El sistema de actuadores está compuesto por un propulsor y dos timones de control para rumbo y profundidad, ubicados todos en la parte trasera del vehículo y accionados eléctricamente. El vehículo puede operar de forma segura hasta profundidades de 10 m.

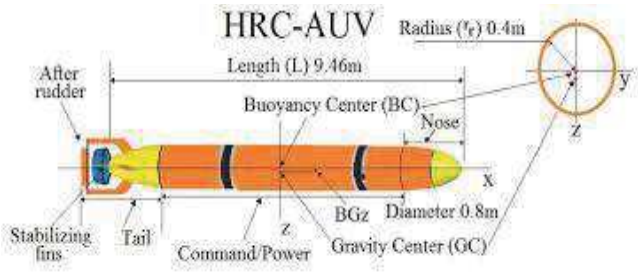


Figura 5. HRC-AUV [9].

De igual forma, los dispositivos de monitoreo tipo avión también han sido usados para el análisis de fuentes hídricas. Es el caso del dron HawkEye Lancaster MK III, mostrado en la Figura 6, es capaz de extraer muestras de agua desde lagos, estanques y otros cuerpos de agua [12]. Así mismo, Silva M. [13] presenta en su artículo que los cuadrirotores también ayudarían a los científicos a indagar en lugares más remotos y de difícil acceso para el ser humano.

Figura 6. HawkEye Lancaster MK III [13].

Algunas de las patentes más recientes relacionadas con dicha actividad son: el registro de propiedad intelectual CN206900659 otorgado en Junio de 2017 y diseñado por Lin Hua (ver Figura 7), el cual consiste en un vehículo aéreo no tripulado para monitoreo de la calidad del agua de río; el cual está constituido por un dron que posee una sonda de agua en cuyo extremo tiene adherido un sensor de PH, un sensor de análisis de calidad de agua que envía información de los iones de metales pesados, nitrógeno amoniacal y fósforo total; un sensor de monitoreo de calidad de agua que envía información numérica detectada, turbiedad, cloro residual, materia suspendida, fluoruro y sulfato del agua. Así mismo cuenta con una cápsula fotoeléctrica instalada debajo del fuselaje junto con una cámara de video [14].

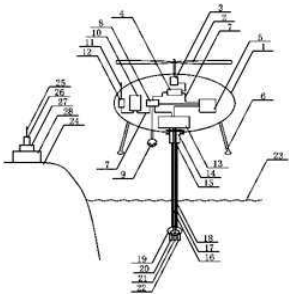


Figura 7. Patente con registro CN206900659 [14]

Otro de los registros más relevantes en este campo es el diseñado por Huang Cheng y He Jinlong en diciembre de 2016 con número de registro 206684137, que consiste en un dron que logra posicionarse sobre una boya que está equipada con un sistema de posicionamiento, módulo de comunicación inalámbrica, módulo de detección de calidad de agua, sistema de alimentación y otros módulos. El dron está programado para ubicar, tomar y transportar las boyas ubicadas en la superficie del agua y llevarlas a tierra para luego ser reemplazadas por nuevas. También cuenta con una cámara y paneles solares fotovoltaicos que suministran la energía a todo el sistema. El esquema general del diseño se muestra en la Figura 8 [15].

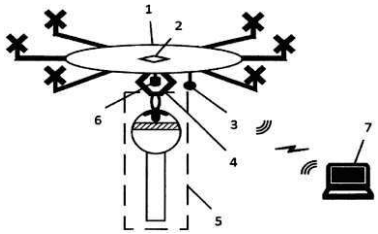


Figura 8. Patente con registro 206684137 [15]

3. Propuesta de diseño CAD del sistema robótico

Para la realización de la propuesta de diseño previamente se conoció el procedimiento establecido en protocolos y las normas que los rigen -expedidos por entidades ambientales [1-2], [5], [16]-, que se tienen en cuenta en las salidas de campo para monitoreo de agua superficial, ya que el mecanismo a diseñar debe realizar dichas actividades como lo expresa la reglamentación para obtener resultados confiables. Por tal motivo, se identifican los requerimientos de diseño para el sistema robótico.

3.1 Requerimientos de diseño

Partiendo del procedimiento para el monitoreo de calidad de agua superficial del IDEAM se identifican las características y requerimientos de diseño para la propuesta del sistema robótico. Éstos son:

- Realizar toma de muestras de agua superficial a una profundidad entre 15 cm y 30 cm.
- Soportar una fuerza de arrastre máximo en efector final aportado por caudales de hasta $230\frac{m^3}{s}$ en un área mínima de $150m^2$.
- Capacidad de desplazarse a diferentes puntos del recurso hídrico de forma georreferenciada.
- Capacidad para almacenar al menos una muestra de agua de 1L por viaje.
- Realizar medición de variables de calidad de agua in-situ -Temperatura (ºC), Conductividad e^- (µS/m), Oxígeno Disuelto (mg/l), pH, Sólidos Disueltos Totales (mg/l), Turbiedad (UNT)-.
- Realizar reconocimiento visual panorámico en inmediaciones de la toma de muestra.
- Enviar la información recolectada in-situ a una base de datos para el usuario.
- Seguir las condiciones y procedimientos preestablecidos en el protocolo para monitoreo de calidad del agua superficial del IDEAM.

3.2 Diseño

Se ha desarrollado una propuesta o diseño CAD del sistema robótico (integral) que cumple con los requerimientos para llevar a cabo el procedimiento de monitoreo de calidad del agua superficial.

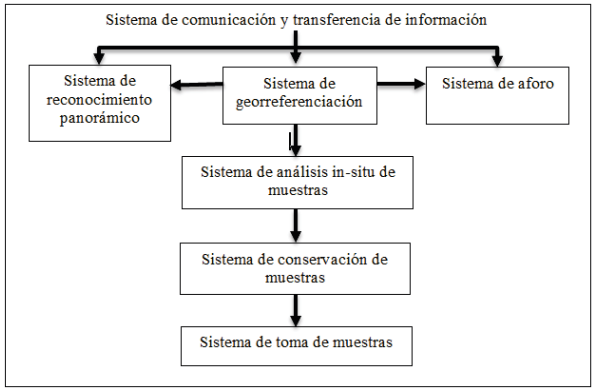


Figura 9. Diagrama de comunicación entre sistemas.

El diseño comprende: sistema de toma de muestras, sistema de conservación de muestras, sistema de análisis in-situ de muestras, sistema de reconocimiento panorámico, sistema de aforo, sistema de georeferenciación y sistema de comunicación y transferencia de información (ver Figura 9).

Así mismo, el sistema robótico será adaptado en la parte inferior de un dron hexa u octorotor de carga para su desplazamiento a puntos deseados. Donde su control podrá ser manual o programado. Un ejemplo de dron a utilizar, es el dron de la Figura 10, el cual tiene una capacidad de carga de hasta 20Kg con autonomía de vuelo de hasta 20min para dicha carga.

Figura 10. Drone 3WWDZ-20L [17].

Una de las fuerzas que más intervienen en el funcionamiento del sistema es la fuerza que ejercerá el agua sobre el robot, ya que el extremo inferior del brazo robótico entrará en contacto con el agua durante el tiempo de la toma de muestra. De acuerdo con los perfiles de velocidad del cauce de fuentes hídricas lóticas que se observa en la Figura 11, el sistema estará diseñado para las mayores velocidades de corrientes de agua. Las velocidades máximas ocurren aproximadamente a 0.2h por debajo de la superficie libre, siendo h la profundidad del flujo. La velocidad media se encuentra aproximadamente a 0.6h, a partir de la superficie [18].

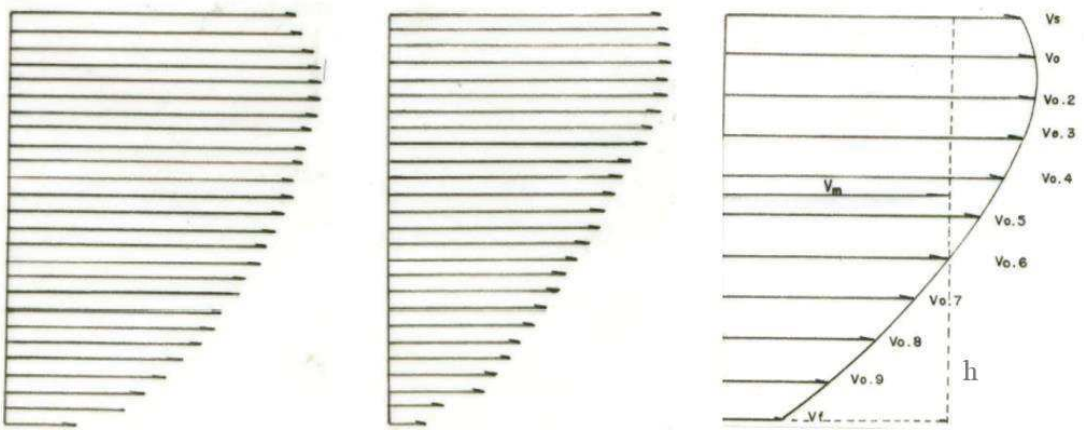


Figura 11. Perfiles de velocidad típicos de corrientes naturales [18].

Así mismo, una segunda fuerza que interviene es la generada por la carga que el dron deberá soportar debida a la estructura que se le adecuará y al peso de la muestra, la carga total se estima esté entre 5-7Kg; es por ello que se requiere de un equipo robusto que pueda contrarrestar dicha fuerza sin perder su estabilidad.

3.2.1 Sistema de toma de muestras. Este sistema está compuesto por un robot serial (a) de 3 grados de libertad (GDL) con efector final tipo griper (b) como se observa en la Figura 12. Las facilidades que ofrece el efector final seleccionado en este proceso es permitir un buen agarre de los recipientes para la toma de muestras, su cargue y descargue. El robot serial se encarga de tomar el recipiente vacío ubicado en la posición de conservación, desplazarlo e introducirlo en el agua a una profundidad especificada, esperar al llenado del recipiente y llevarlo nuevamente a la posición de conservación de la muestra.

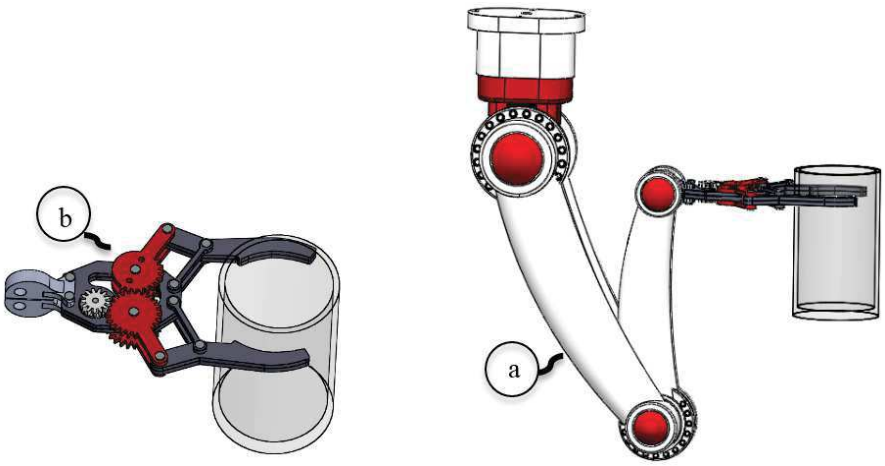


Figura 12. Sistema de toma de muestras

El análisis cinemático directo para el diagrama de la Figura 13, permite expresar el movimiento del brazo de 3 GDL (RRR) de tal manera que con los ángulos para las tres articulaciones se pueda determinar la posición y orientación del efector final O3. Dicho análisis se presenta a continuación:

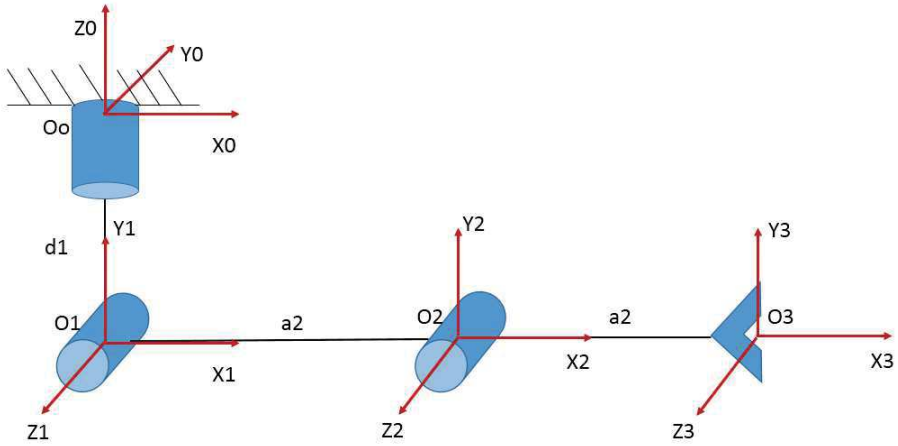


Figura 13. Diagrama Cinemático de Robot serial con 3 GDL con sistemas coordenados.

Mediante la referenciación de cada articulación por medio de sistemas coordenados aplicando la convención del algoritmo de Denavit-Hartenberg (DH) al diagrama cinemático de la Figura 13, se genera la tabla de parámetros (Tabla 2), se aplica el modelo matricial de DH y se determina la posición del efector final respecto al sistema base Oo, obteniéndose un sistema de ecuaciones en función de las variables articulares.

Tabla 2. Parámetros Denavit-Hartenberg del brazo 3GDL.

Eslabón (i)	a_i	$\propto$	d_i	θ_i
1	0	$\pi/2$	d_i	θ_1
2	a_i	0	0	θ_2
3	a_i	0	0	θ_3

De acuerdo con las convenciones de DH, cada variable corresponde a:
θi: ángulo medido del eje *xi−1* al eje *xi* teniendo como eje de giro a *zi−1*.
di: distancia del sistema coordenado *i-ésimo−1* hasta la intersección de los ejes *zi−1* y *xi* medida sobre *zi−1*.
ai: distancia del sistema coordenado *i-ésimo* hasta la intersección de *zi−1* y *xi* medida sobre *xi*.
αi: ángulo medido del *eje zi−1* al eje *zi*, tomando como eje de giro al eje *xi*.

Tomando en cuenta las restricciones de la representación de DH, se puede representar cualquier rotación o desplazamiento con las transformaciones homogéneas *Ai* de cada eslabón:

$$A_i = \begin{bmatrix} {}^0R_i & {}^0T_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

donde,
${}^0R_i$: es una matriz de rotación, que representa la rotación del sistema coordenado *i-ésimo*, respecto al sistema base y,
${}^0T_i$: representa la traslación del sistema coordenado *i-ésimo*, respecto al sistema base.

Con base en los parámetros de Denavit-Hartenberg de la Tabla 2, se obtienen las matrices homogéneas del brazo robótico.

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2\cos\theta_1 & \sin\theta_2\cos\theta_1 & \sin\theta_1 & a_2\cos\theta_2\sin\theta_1 \\ \cos\theta_2\sin\theta_1 & \sin\theta_2\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & a_2\cos\theta_2\cos\theta_1 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & a_2\sin\theta_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3\cos\theta_1 & -\sin\theta_3\cos\theta_1 & \sin\theta_1 & (a_3\cos(\theta_3+\theta_2)+a_2\cos\theta_2)\cos\theta_1 \\ \cos\theta_3\sin\theta_1 & -\sin\theta_3\sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & (a_3\cos(\theta_3+\theta_2)+a_2\cos\theta_2)\sin\theta_1 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & a_3\sin(\theta_3+\theta_2)+a_2\sin\theta_2+d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

De la tercera columna de la Ecuación 4, se obtienen las ecuaciones para la cinemática directa, las cuales representan la posición del efector final.

$$Px = (a_3\cos(\theta_3+\theta_2)+a_2\cos\theta_2)\cos\theta_1 \tag{5}$$

$$Py = (a_3\cos(\theta_3+\theta_2)+a_2\cos\theta_2)\sin\theta_1 \tag{6}$$

$$Pz = a_3\sin(\theta_3+\theta_2)+a_2\sin\theta_2+d_1 \tag{7}$$

Definidas estas coordenadas (en función de los ángulos de las articulaciones), se realiza la cinemática inversa para definir la posición (rotación) de los motores o variables articulares en función de la posición del efector final mediante modelo geométrico obtenido de la Figura 14.

Observando el plano Xo;Yo se obtiene θ_1.

$$\theta_1 = atan2\left(\frac{y}{x}\right) \tag{8}$$

Sacando proyecciones sobre el plano Z0 y Y0, se obtienen los valores de θ_2 y θ_3. Determinándose primero θ_2 y luego θ_3. Ya que θ_3 depende de θ_2. Sin embargo, para visualizar mejor las proyecciones se e hace un corte de un plano en Z y la posición que se encuentre el efector final entre X y Y, como se visualiza en la Figura 14.

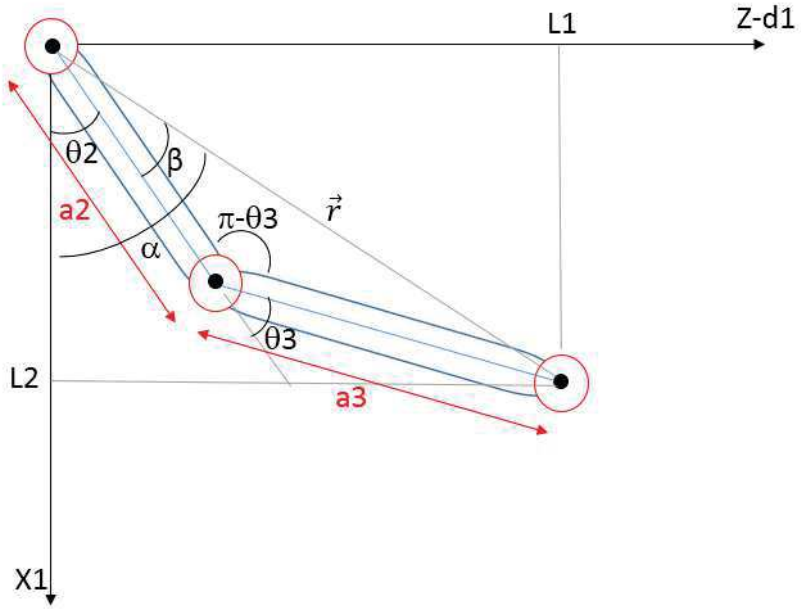


Figura 14. Diagrama cinemático con proyección sobre el plano intermedio.

$$\theta_2 = \alpha - \beta \tag{9}$$

donde α es el ángulo comprendido entre los segmentos $L1$ y $L2$. Aplicando relaciones trigonométricas se obtiene θ_2.

$$\alpha = atan2(L1/L2) \tag{10}$$

$$\beta = atan2\left(\frac{a_3 \sin\theta_3}{a_3 \sin\theta_3 + a_2}\right) \tag{11}$$

Se reemplaza la Ecuación 10 en la Ecuación 9:

$$\theta_2 = atan2(L1/L2) - atan2\left(\frac{a_3 \sin\theta_3}{a_3 \sin\theta_3 + a_2}\right) \tag{12}$$

Para hallar θ_3 se aplica la Ley de cosenos para el triángulo conformado por a2 y a3.

$$|\vec{r}| = {a_2}^2 + {a_3}^2 + 2a_2 a_3 cos(\pi - \theta_3) \tag{13}$$

Despejando θ_3 de la Ecuación 13, se tiene:

$$\theta_2 = atan2\left(\frac{\sqrt{1-D^2}}{D}\right) \tag{14}$$

Por medio del software Matlab, se modeló el funcionamiento del brazo 3 GDL para el seguimiento de la trayectoria esperada, del cual se obtienen las gráficas de la Figura 15.

Debido a que la trayectoria total del efector final está compuesta por varios desplazamientos, se programa cada una de ellas por medio de funciones independientes. La

primera trayectoria (b) lleva al efector final desde la posición inicial a la posición para toma de muestra en el interior del agua.

La segunda trayectoria (c) lleva al efector final desde la posición para toma de muestra en el interior del agua a la posición de análisis de la muestra.

Para trasladar el efector final de la posición de análisis de variables de calidad del agua a la posición de la conservación de la muestra, se pondrá en funcionamiento la articulación en la base *Oo*, realizando un giro de 180°. La tercera trayectoria programada (d), lleva al efector final desde la posición de análisis de la muestra o posición de conservación, a su posición inicial.

En la Figura 15 se muestra la trayectoria seguida por el efector final del brazo 3 GDL (línea de color negro) y tres de las posiciones esperadas en su trayectoria. Las líneas rojo y verde, representan los dos eslabones que componen el brazo de 3 GDL.

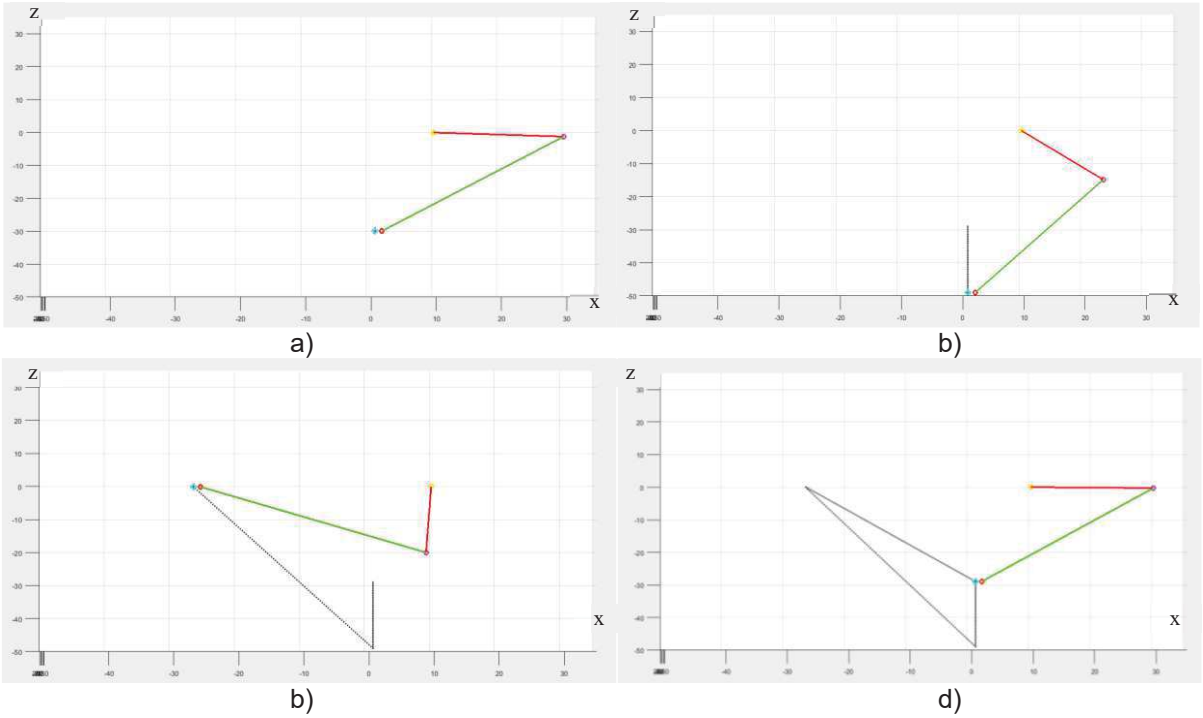


Figura 15. Modelamiento de trayectoria básica requerida en Matlab.

Finalmente, con esta información se puede modelar el comportamiento del brazo robótico en cualquier posición dentro del espacio de trabajo, y el seguimiento de un sinnúmero de trayectorias - puede ser reconfigurado como el usuario lo desee y cuantas veces desee con sólo programar la trayectoria- para luego aplicar distintas leyes de control al modelo obtenido.

3.2.2 Sistema de conservación de muestras. El sistema está conformado por (ver Figura 16) una pinza (a) que sujeta la tapa (b) del recipiente portador de la muestra. Una vez se miden las variables de calidad del agua con los sensores multiparámetro, el griper que porta la muestra (c) se desplazará a la posición de la pinza con la tapa. Por medio de la acción de un motor (d) se girará la pinza de modo que la tapa sea puesta en el recipiente, es decir, el recipiente sea sellado. Permitiendo la conservación de la muestra hasta ser puesta en tierra.

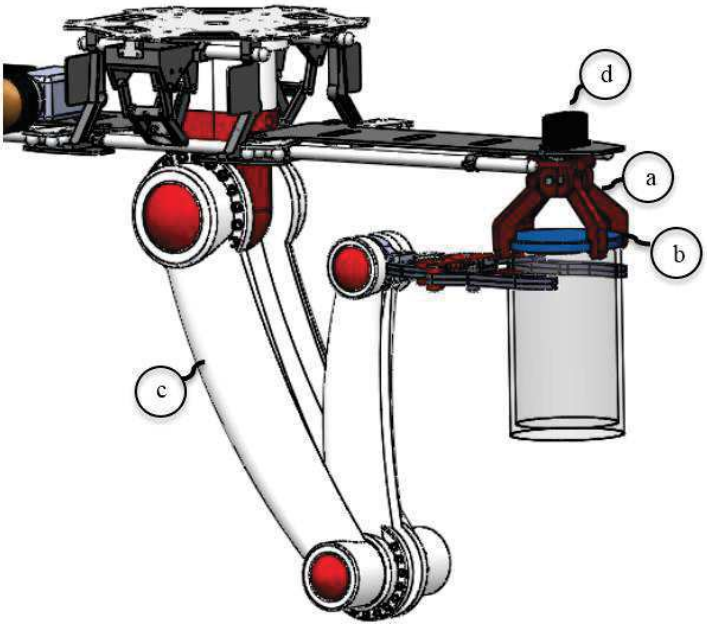


Figura 16. Diseño CAD sistema de conservación de muestras.

3.2.3 Sistema de análisis in-situ de muestras. Para el análisis in-situ de variables de calidad del agua superficial, se cuenta con el sistema mostrado en la Figura 17, que porta un par de sensores multiparámetro (a), los cuales permiten medir variables como: Temperatura (ºC), Conductividad e^- (µS/m), Oxígeno Disuelto (mg/l), pH, Sólidos Disueltos Totales (mg/l), Turbiedad (UNT). Una vez el sensor hace la medición, los datos son almacenados y enviados al sistema de comunicación y transferencia de información (b).

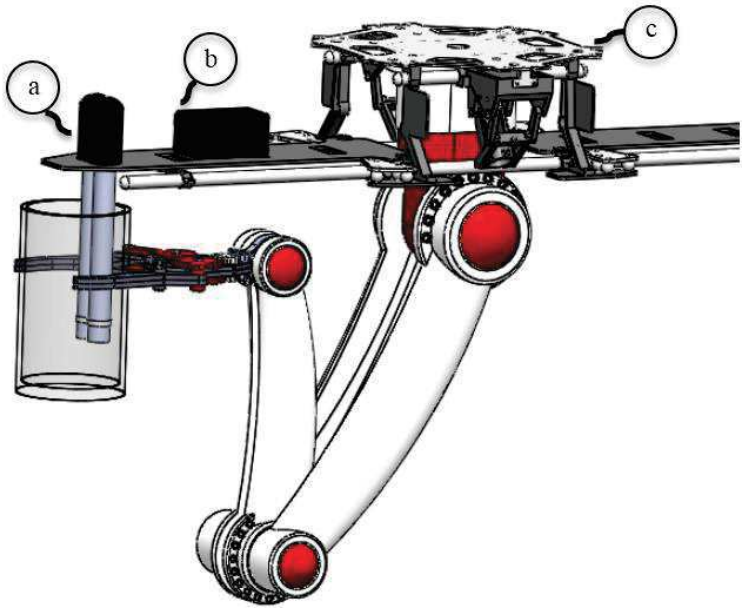


Figura 17. Diseño CAD del sistema de análisis in-situ de muestras.

3.2.4 Sistema de reconocimiento panorámico. El reconocimiento panorámico es realizado por medio de una cámara de alta resolución (Ver figura 19 -b-) que está montada sobre el

armazón del sistema en general (Ver figura 17 -c-). La cámara se encuentra comunicada inalámbricamente con el sistema de recepción de información en tierra.

3.2.5 Sistema de aforo. Este sistema está comprendido por un Perfilador de corriente acústico por efecto Doppler (ADCP), un ecosonda multihaz (MBES) o un Airborne LIDAR Hidrographic (ALH). Estos equipos proporcionan información relacionada con la profundidad del cauce del recurso hídrico, basada en el tiempo de recepción del eco del sonido o haz de luz laser emitidos a una frecuencia fija, así mismo pueden proporcionar componentes de velocidad del agua en diferentes capas de la columna de agua permitiendo con esta información hallar el caudal (ver Figura 18). Este tipo de dispositivos permite realizar aforo a cuerpos hídricos lóticos y lenticos de aguas poco profundas.

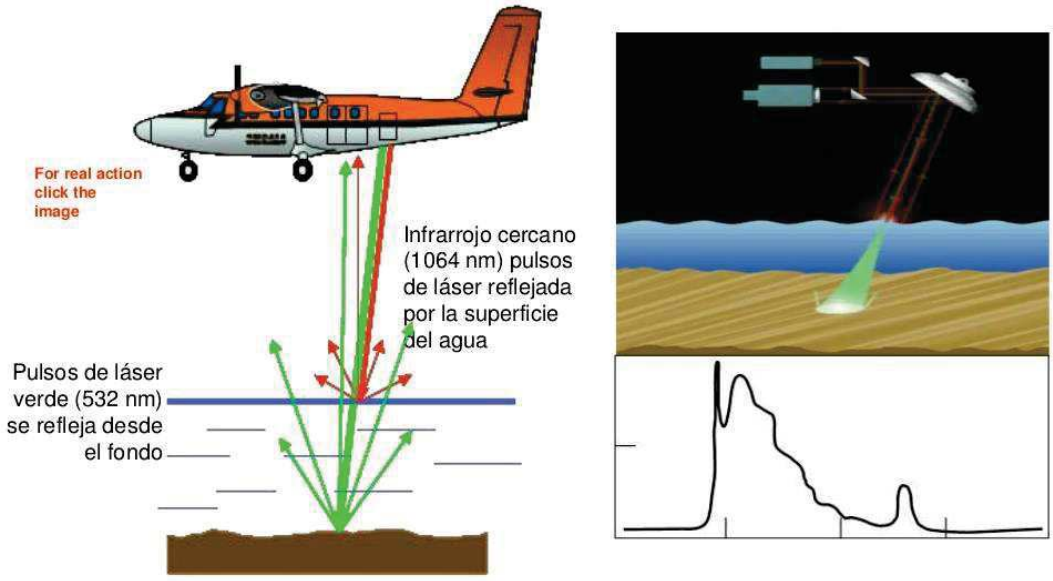


Figura 18. Sistema de aforo [19].

3.2.6 Sistema de georeferenciación. Este sistema comprende elementos electrónicos para la localización georreferenciada del sistema robótico (antena para georeferenciación y tarjetas de procesamiento y comunicación – ver figura 19 a-) y su comunicación y transmisión de información al sistema de recepción en tierra, este sistema se encuentra en el interior de una caja para su protección a la cual se le llamará unidad central de procesamiento.

3.2.7 Sistema de comunicación y transferencia de información. Al igual que el sistema de georeferenciación, el sistema de comunicación y transferencia de información se encuentra compuesto por elementos electrónicos que permiten la comunicación entre el sistema robótico y el sistema de recepción en tierra; y hace parte de la unidad central de procesamiento.

Integrando todos los sistemas se conforma el sistema general, el cual se puede observar en la Figura 19, en donde se visualizan cada uno de los sistemas anteriormente mencionados.

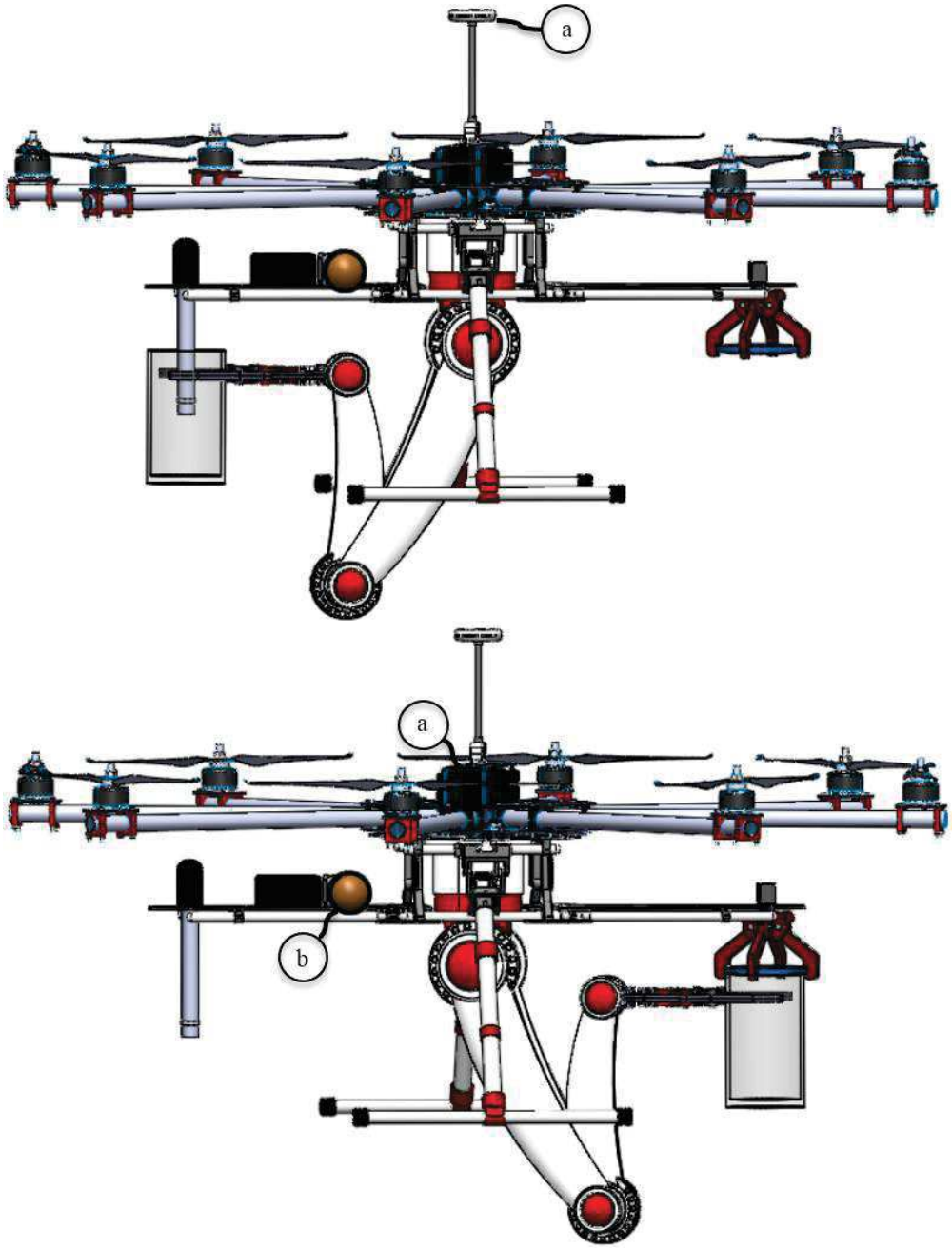


Figura 19. Diseño CAD de sistema robótico.

El diseño de la Figura 19, al ser un sistema integral para labores de monitoreo de calidad del agua superficial, permite que el personal encargado de dicha labor evite riesgos en su integridad física, obtenga datos confiables de las mediciones, tenga un registro panorámico del lugar permitiéndole identificar factores externos presentes en el lugar, los cuales intervienen en el cambio de estado de la calidad del agua; todo esto de forma rápida y segura. Haciendo que este diseño tenga una mayor funcionalidad y alcance que los sistemas mencionados en la Sección 2: Monitoreo de calidad del agua. Así mismo, por medio de la inclusión de un brazo robótico, se evita la recirculación del agua en el recipiente y el proceso de purga de los mecanismos para obtención de muestras, puesto que en este caso la actividad se realiza directamente con el recipiente empleado para su almacenamiento.

4. Conclusiones

Partiendo de la indagación del proceso de monitoreo de calidad de agua superficial y de los desarrollos existentes, se plantea un diseño de un sistema integral asistido por computadora o sistema robótico que permita la recolección adecuada de la muestra de agua de forma segura para la persona que realiza esta acción, para llevar un registro, almacenamiento y análisis sistemático de las variables de forma fiable, controlada y oportuna.

Se identificaron las características y requerimientos de diseño del sistema robótico, los cuales cumplen con el protocolo para el monitoreo de calidad de agua superficial que expide el IDEAM. De esta forma el diseño CAD propuesto del sistema robótico integral está compuesto por siete sistemas, entre ellos: un sistema de toma de muestras, sistema de conservación de muestras, sistema de análisis in-situ de muestras, sistema de reconocimiento panorámico, sistema de aforo, sistema de georeferenciación y sistema de comunicación y transferencia de información.

Para cada sistema que compone el sistema robótico semiautomático para monitoreo de calidad del agua superficial, se definieron los elementos de diseño y mecanismos más idóneos, que respondan a un sistema de control integral y de transferencia de información. Por ejemplo, para el sistema de toma de muestra, se definió un sistema cinemático compuesto por un robot serial de 3 grados de libertad con efector final tipo griper, con el propósito de equilibrar las fuerzas y movimientos en el momento del cargue y descargue de la muestra a través del recipiente recolector de agua. De esta forma, se identificó y validó la expresión matemática para modelar el comportamiento del brazo robótico.

La siguiente etapa del proyecto es el modelamiento completo del prototipo, en donde se debe incluir el análisis dinámico del mecanismo y el análisis de esfuerzos en puntos críticos, para pasar a su construcción y validación en laboratorio. Posteriormente se realizarán pruebas en campo validando y comparando cada recolección y análisis de monitoreo de calidad del agua superficial in situ y en laboratorio.

Referencias

[1] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *"Decreto - Ley 2811 de 1974, Art. 20",* Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, Bogotá D.C, Colombia, 2014. [En línea] Disponible en: http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-Ley-2811-de-1974.pdf.

[2] IDEAM, INVEMAR. "*Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua"*. pp. 306-326. Bogotá, D.C., Colombia, 2017.

[3] Hunink J., "*Drones que aportan soluciones en el sector del agua: desde la guerra hacía la paz".* 2015. [En línea] Disponible en: https://www.iagua.es/blogs/johannes-hunink/drones-que-aportan-soluciones-sector-agua-guerra-paz-hidrica

[4] Vizcaíno et al., "*Water Quality Sensing and Spatio-Temporal Monitoring Structure with Autocorrelation Kernel Methods"*, Sensors. Vol. 17, Num. 10, pp. 2357, 2017.

[5] OMM, *"Guía de prácticas hidrológicas"*, Vol 1, No.168, Suiza, Sexta Ed., 2011.

[6] Pule M. et al., "*Wireless sensor networks: A survey on monitoring water quality. Journal of Applied Research and Technology"*. 2017. [En línea] Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.07.004

[7] Subsea World News, "*Oceanscience: Autonomy to Z-boat's Capabilities".* Agosto 15, 2014. [En línea] Disponible en: https://subseaworldnews.com/2014/08/15/oceanscience-autonomy-to-z-boats-capabilities/

[8] Ultimahora, "*Proponen usar dron acuático"*. Junio, 2016. [En línea] Disponible en: https://www.ultimahora.com/proponen-usar-dron-acuatico-n1000691.html

[9] Martínez et al., "Diseno de AUV. Arquitectura de hardware y software". Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 10, PP. 333–343, 2013.

[10] Breivik M., Fossen T., "*Guidance laws for autonomous underwater vehicles"*. In: Inzartsev, A. V. (Ed.), Underwater Vehicles. InTech, Vienna, Austria, pp. 51–76, 2009.

[11] Sanz et al., "*Recent progress in the rauvi project. a reconfigurable autonomous underwater vehicle for intervention".* In: 52th International Symposium ELMAR-2010. IEEE, Zadar, Croatia, pp. 471–474, 2010.

[12] Luque F., "*Uso de drones para el monitoreo ambiental"*, Natural Zone. 2017. [En línea] Disponible en: http://natzone.org/index.php/nosotros/presentacion/15-frontpage-blog/desarrollo-tecnologico/398-uso-de-drones-para-el-monitoreo-ambiental2

[13] Silva M., "*Desarrollan drones que ayudarían al monitoreo ambiental"*, Fayer Wayer. 2015. [En línea] Disponible en: https://www.fayerwayer.com/2015/01/desarrollan-drones-que-ayudarian-al-montireo-ambiental/

[14] Hua L., *"Unmanned aerial vehicle of quality of water of long monitoring river that uses in river"*. Patente No. C206900N659, Junio de 2017.

[15] Cheng H. y Jinlong H., *"Input formula water quality testing nacelle platform based on unmanned aerial vehicle"*. Patente No. 206684137, diciembre de 2016.

[16] Ministerio de la Protección Social, Decreto No. 1575 de 2007, Art. 2. Colombia.

[17] Jiangsu Wode Agricultural Machinery Co., Ltd. "*Drone 3WWDZ-20L"*, Wo De Xiang Long, 2018. [En línea] Disponible en: https://www.nongjitong.com/company/30.html.

[18] Pérez R., *"Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica".* Escuela de geociencias y medio ambiente. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Colombia, 2005. [En línea] Disponible en: http://bdigital.unal.edu.co/12697/68/3353962.2005.Parte%2013.pdf.

[19] Ramírez G., *"Tecnología LIDAR: Principios fundamentales y aplicaciones".* Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de ingeniería geológica, minera, metalúrgica y geográfica. Perú. junio, 2010. [En línea] Disponible en: https://es.slideshare.net/ruthop7/lidar-princ-fundamentales-54242590.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 12, pp.144 - 158, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Metodología de Programación de Trayectorias de un Robot de 2GDL Utilizando la Tarjeta STM32L476RG

Cerón-Morales Israel, Herver-Acuña José Francisco, Castillo-Castillo Sandra Judith y Cortez-Martínez Wendy Aritzel

Instituto Tecnológico Superior de Poza Rica, Calle Luis Donaldo Colosio Murrieta S/N, Col. Arroyo del Maíz C.P. 93230, Poza Rica Veracruz, México. Israel.ceron@itspozarica.edu.mx

Resumen

En el trabajo se presenta el modelado, la programación, simulación, diseño en CAD y control de un robot manipulador de 2GDL (dos grados de libertad). Para poder controlar los movimientos del robot, fue diseñado con el modelado que implementa el control de Takegaki y Arimoto, Euler Lagrange y cinemática directa e inversa. Por último, el robot 2GDL fue diseñado con el propósito de escribir la palabra "HOLA" con menos margen de error y mayor precisión con relación a otros trabajos.

Palabras clave: NUCLEO STM32, Robot 2GDL, Trayectorias X-Y, Control de Takegaki y Arimoto, Euler Lagrange, Cinemática directa e inversa.

1. Introducción

Los Robots Manipuladores encuentran una diversa cantidad de aplicaciones, desde la soldadura en la industria automotriz, el maquinado de piezas de ingeniería, hasta el arte y el entretenimiento, siendo de interés para los autores el desarrollar una metodología que permita utilizar un robot manipulador con la finalidad de escribir un texto entendible.

La escritura inicia desde las antiguas civilizaciones, siendo los Sumerios los que realizan los primeros registros escritos, para lo cual utilizaban tablillas de barro, desde entonces la escritura ha evolucionado, y hoy día los estudiantes de ingeniería pretenden utilizar a los robots como los escritores de la nueva historia. Durante siglos los seres humanos han construido maquinas que imiten las partes del cuerpo humano. Un ejemplo claro son los antiguos egipcios que unieron brazos mecánicos a las estatuas de sus dioses, estos brazos fueron operados por sacerdotes, quienes clamaban que es el movimiento de estos eran inspiración de sus dioses

A finales de los 40 se inician programas de investigación en los laboratorios de *Oak Ridge y Argonne National Laboratories* para desarrollar manipuladores mecánicos para elementos radiactivos. Estos manipuladores eran del tipo "maestro-esclavo", diseñados para que reprodujeran fielmente los movimientos de brazos y manos realizados por un operario.

El inventor estadounidense George C. Devol desarrolló en 1954 *un dispositivo de transferencia programada articulada* (según su propia definición); un brazo primitivo que se podía programar para realizar tareas específicas.

Para realizar el control de posición de robots manipuladores industriales se han reportado numerosas técnicas durante las últimas décadas. Normalmente se diseñan las trayectorias de referencia en el espacio cartesiano y se utiliza la cinemática inversa del manipulador para obtener las trayectorias correspondientes en el espacio articular. Una vez obtenidas estas trayectorias de referencia, se realiza el control en este último espacio considerando que se miden las posiciones y las velocidades articulares.

El estudio de control de posición y de movimiento de los robots Manipuladores requiere del conocimiento del modelado de su dinámica, así como las propiedades matemáticas que de ésta derivan, El problema de control de posición (también llamada regulación) es uno de los temas más relevantes en robótica. El objetivo principal es el posicionamiento del efector final dentro de su espacio de trabajo en la posición deseada no importando la posición inicial del brazo manipulador. Una estrategia sencilla de regulación de posición es el PD, el cual era el algoritmo más ampliamente utilizado estudiado por Takegaki y Arimoto propusieron una ley de control que se aplica a los robots manipuladores. La nueva aproximación es desarrollada con base a la técnica de moldeo de energía propuesta por Takegaki y Arimoto en 1981 y reformulada posteriormente por Kelly en 2000.

El modelo dinámico del robot describe la evolución en el tiempo de las articulaciones del robot como función de torques y fuerzas aplicadas a este. Aunque las ecuaciones dinámicas de este tipo de máquinas pueden obtenerse a partir de las ecuaciones de movimiento de Newton, el análisis se complica notablemente cuando el número de las articulaciones del brazo aumenta en casos como estos es conveniente emplear las ecuaciones del movimiento de LaGrange. Según la teoría de LaGrange la dinámica del robot manipulador de n grados de libertad está representada por la ecuación:

$$\tau = M(q) * \ddot{q} + c(q, \dot{q}) * \dot{q} + f(\dot{q}) + G(q) + \tau_p \quad (1)$$

$M(q)$= Matriz de inercia en [Kg-rad], de dimensiones $n\ x\ n$
$c(q, \dot{q})$= Vector de términos centrípetos y de Coriolis en [Kg-rad/s], de dimensiones $n\ x\ 1$
$f(\dot{q})$= Vector de $n\ x\ 1$ que modela las fricciones de las articulaciones, en [N].
$G(q)$= Vector $n\ x\ 1$ de términos gravitatorios en [N*m].
τ_p=Perturbación que considera la dinámica no modelada del sistema en [N*m].
τ=Vector de torques aplicados a cada una de las articulaciones en [N*m].

2. Preliminares Teóricos

2.1 Configuración de la Tarjeta STM32L476

En esta sección se configura la tarjeta STM32L476RG para trabajar con señales Analógicas de entrada y señales Analógicas de Salida. En la Figura 1 se muestra el icono del software STMCubeMX, al dar doble clic aparece la interfaz que se muestra en la Figura 2 y la figura 3.

Figura 1. Icono del software STM32CubeMX.

Entonces el usuario debe seleccionar “Access To Board Sellector”, si aparece una ventana emergente pidiendo que nos conectemos a un nodo de internet, se recomienda ignorarlo dando clic en “NO”.

En la barra de búsqueda escribimos “STM32L476RG” y aparece una tarjeta de desarrollo la cual seleccionaremos y se mostrara una pantalla que permite configurar los pines del microcontrolador. Es este punto se recomienda poner todos los pines en estado de reset, como se observa en la Figura 4.

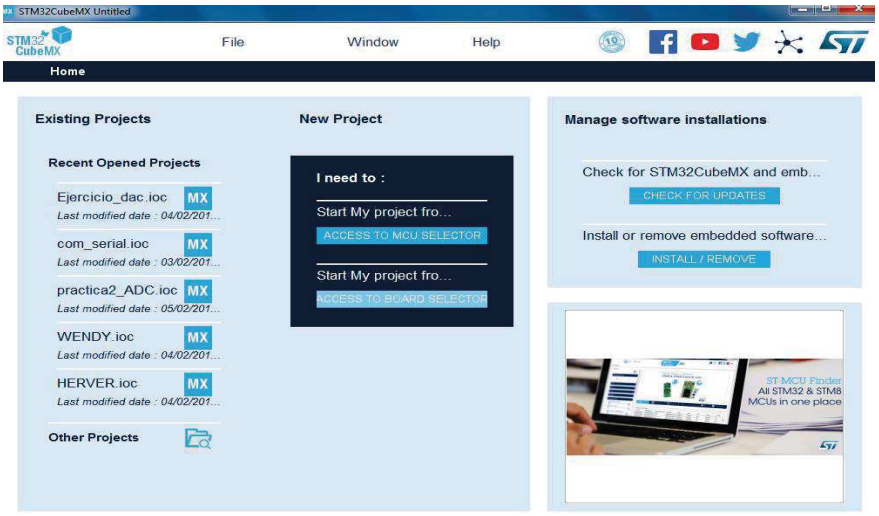


Figura 2. Interfaz gráfica del software STM32CubeMX.

Una vez que todos los pines están en condición de reset, es momento de definir una entrada y una salida ambas analógicas, además de comunicación serial con el fin de observar los datos en el monitor Serial, el monitor serial recomendado es Tera Term, no obstante Termite también es una buena opción, la diferencia es que Tera Term tiene el fondo negro y Termite tiene el Fondo blanco por defecto.

Para seleccionar un pin de entrada analógico, se considera la Figura 3 en donde se selecciona un ADC, y en la entrada “IN1” se elige “IN1 Single Ended” esta opción permite configurar las características del pin analógico de entrada, el cual es el pin PC0. Se selecciona “Independent Mode”, “Asynconous Clock Mode Divider by 64” debido a que el reloj del ADC es de 64 MHz y al dividirlo entre 64 se muestrea con 1 MHz de frecuencia, la cual es una buena velocidad para los propósitos de este Texto, “Scan Conversion Mode” estará en formato Enable pero esto se configura en Software, en “Continous Conversion Mode” habilitamos Enable, en “End of Sellection Conversion” se elige End of Sequence of Conversion, en “Overrrun Behavior” se elige Overrun Data Overwritten. Y con esto ya tenemos configurada una entrada Analógica a la tarjeta STM32L476RG.

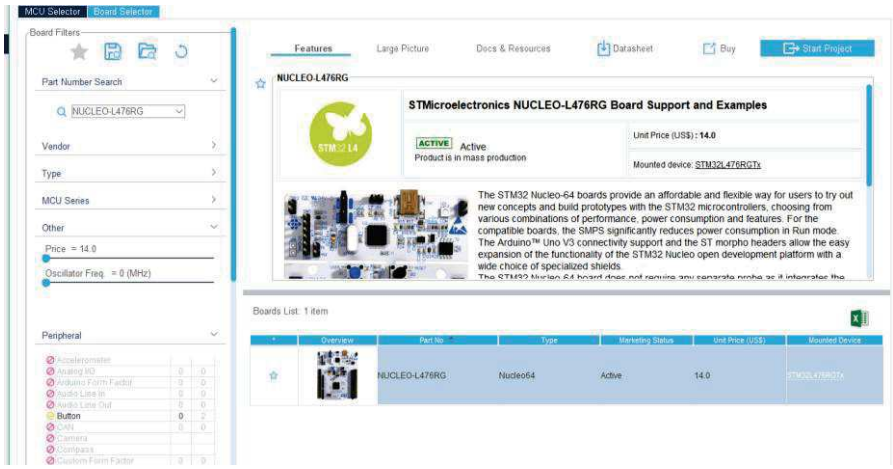


Figura 3. Interfaz que nos muestra como seleccionar la tarjeta STM32L476RG.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 12, pp.144 - 158, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

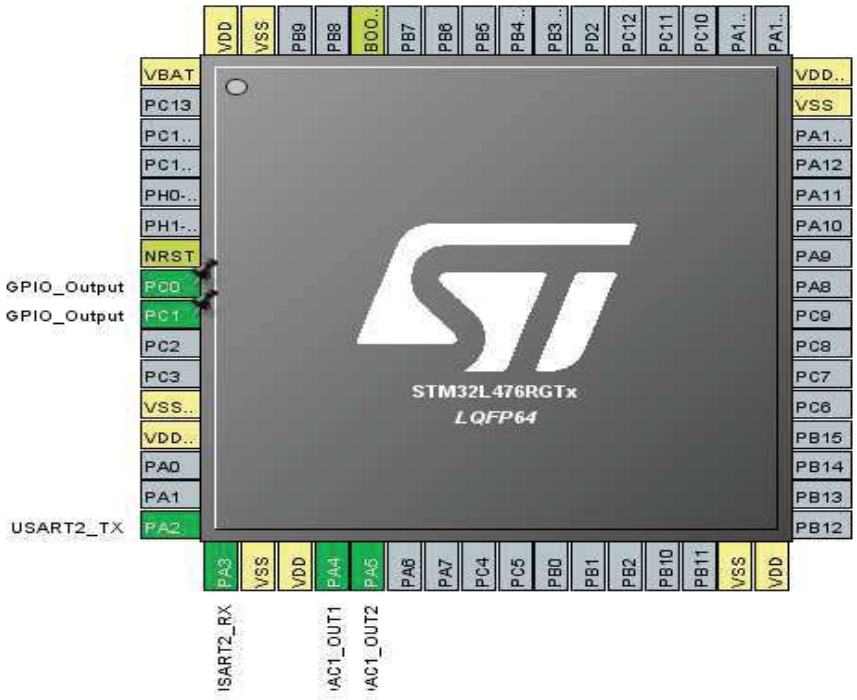


Figura 4. Interfaz STMCubeMX que permite establecer todos los pines al estado de Reset.

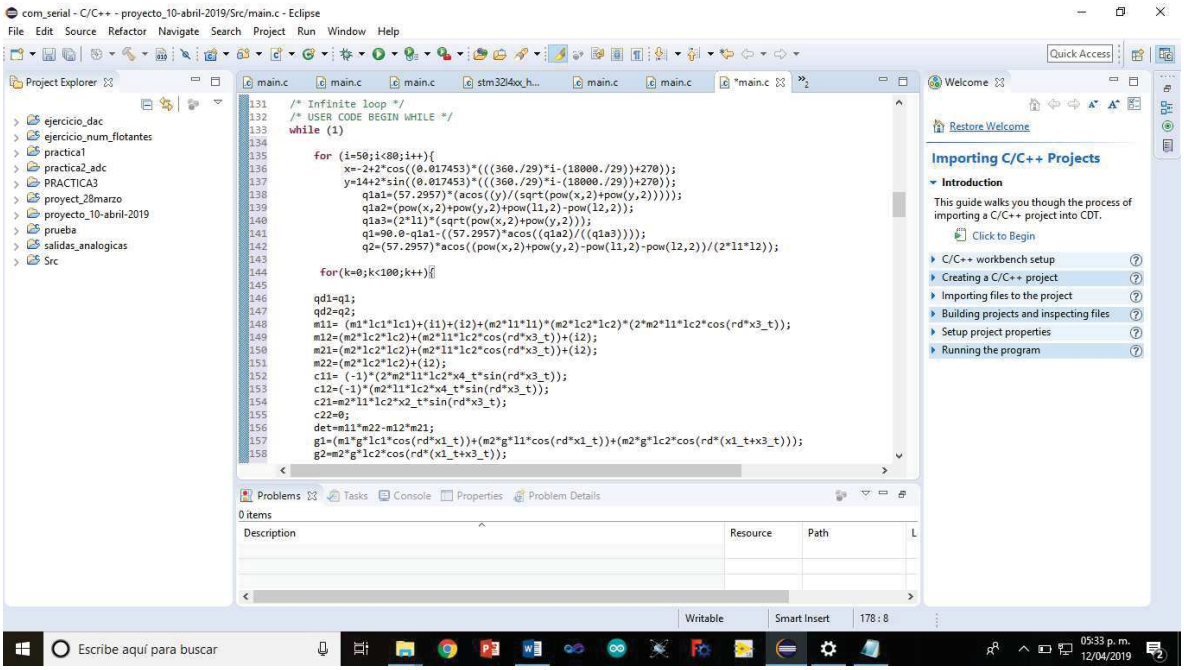


Figura 5. Interfaz donde se escribe el siguiente código.

Lo siguiente es el código de programación utilizado para la letra "O".

```
for (i=50;i<80;i++){
x=-2+2*cos((0.017453)*(((360./29)*i-(18000./29))+270));
y=14+2*sin((0.017453)*(((360./29)*i-(18000./29))+270));
q1a1=(57.2957)*(acos((y)/(sqrt(pow(x,2)+pow(y,2)))));
q1a2=(pow(x,2)+pow(y,2)+pow(l1,2)-pow(l2,2));
q1a3=(2*l1)*(sqrt(pow(x,2)+pow(y,2)));
q1=90.0-q1a1-((57.2957)*acos((q1a2)/((q1a3))));
q2=(57.2957)*acos((pow(x,2)+pow(y,2)-pow(l1,2)-pow(l2,2))/(2*l1*l2));
for(k=0;k<100;k++){
qd1=q1;
qd2=q2;
m11= (m1*lc1*lc1)+(i1)+(i2)+(m2*l1*l1)*(m2*lc2*lc2)*(2*m2*l1*lc2*cos(rd*x3_t));
m12=(m2*lc2*lc2)+(m2*l1*lc2*cos(rd*x3_t))+(i2);
m21=(m2*lc2*lc2)+(m2*l1*lc2*cos(rd*x3_t))+(i2);
m22=(m2*lc2*lc2)+(i2);
c11= (-1)*(2*m2*l1*lc2*x4_t*sin(rd*x3_t));
c12=(-1)*(m2*l1*lc2*x4_t*sin(rd*x3_t));
c21=m2*l1*lc2*x2_t*sin(rd*x3_t);
c22=0;
det=m11*m22-m12*m21;
g1=(m1*g*lc1*cos(rd*x1_t))+(m2*g*l1*cos(rd*x1_t))+(m2*g*lc2*cos(rd*(x1_t+x3_t)));
g2=m2*g*lc2*cos(rd*(x1_t+x3_t));
tao1=k1*(qd1-x1_t)-kv1*x2_t+g1;
tao2=k2*(qd2-x3_t)-kv2*x4_t+g2;
x1=T*x2_t+x1_t;
x2=(T/det)*(m22*tao1-m22*c11*x2_t-m22*c12*x4_t-m22*b1*x2_t-g1*m22-
m12*tao2+m12*c21*x2_t+m12*c22*x4_t+m12*b2*x4_t+g2*m12)+x2_t;
x3=T*x4_t+x3_t;
x4=(T/det)*(m21*c11*x2_t-m21*tao1+m21*c12*x4_t+m21*b1*x2_t+m21*g1+m11*tao2-m11*c21*x2_t-
m11*c22*x4_t-m11*b2*x4_t-m11*g2)+x4_t;
x1_t=x1;
x2_t=x2;
x3_t=x3;
x4_t=x4;
sprintf(msn," %f  %f  %f  %f\  %f  %f\n\r",i,x,y,q1,q2,x1,x3);
HAL_UART_Transmit(&huart2,(uint8_t *)msn,200,200);
HAL_Delay(10);
HAL_Delay(10);
}
```

La librería que se utilizó para los servos es la que se muestra a continuación:

```
Int pin n=n;
Float tiempo_angulo;
//Posición deseada y límite máximo en grados de movimiento para SRT2K5A.
Float qd=90.0;  qmax=125.0;
Void setup(){// rutina de configuración.
    PinMode (pin5, OUTPUT) ;//puerto digital 5 configurado como salida.
}
Void mueve_servo (int tiempo) {/ /rutina para girar al servo.
    Int i;
    For (i=0; i<100; i++) {// aplicación continua de pulsos para alcanzar qd.
        digitalWrite (pin5, HIGH) ;// pulso en estado alto.
        delayMicroseconds(tiempo);//tiempo del pulso en novel alto (HIGH).
        digitalWrite (pin5, LOW) ;//pulso en nivel bajo (LOW).
        delayMicroseconds (10000) ;//tiempo de 10 ms (10000 μs) en nivel bajo.
```

```
      }
}
Void loop () {//lazo principal de programación.
      Mueve_servo (1000);//posición de casa 0° (1 mseq).
      //Ecuación que determinara la conversación de tiempo de modulación en función del ángulo qd.
     // t=1+ qd/qmax.
Tiempo_angulo=1+(qd/qmax) ;//cálculo del tiempo para alcanzar qd.
Mueve_servo(1000*tiempo_angulo) ;//tiempo en microsegundo para alcanzar qd.
}
//para compilar, descargar y ejecutar este sketch,
```

2.2 Modelado matemático

El modelado matemático de un robot manipulador está basado en la cinemática y en la dinamina de su mecanismo de eslabones articulador, ambos permiten el diseño de una configuración del robot, así como el estudio de algoritmos de control que permitan que se desempeñe adecuadamente durante el desarrollo de una tarea.

El modelado cinemático del robot consiste en encontrar las ecuaciones de la cinemática directa e inversa de posición, velocidad y aceleración. El modelado cinemático directo consiste en determinas las coordenadas operacionales y derivadas respecto al tiempo, estas ecuaciones permiten conocer sus valores instantáneos de la posición velocidad y aceleración del robot durante la ejecución de una tarea. El modelado cinemático inverso consiste en determinas las coordenadas generalizadas (variables de control) en función de las coordenadas operaciones (trayectorias)

La cinemática directa
$q1$ =Es el ángulo del eslabón 1 con respecto al eje -y
$q2$ =Es el ángulo del eslavo 2 con respecto a la línea l1
$l1$ =Es la longitud del eslabón 1
$l2$ =Es la longitud del eslabón 2

se debe encontrar el vector $\vec{r}$ el cual está formado por los valores x-y de la cinemática directa. Se toma como referencia el ángulo $q1$ para las componentes del primer eslabón mostradas en la Ec.2

$$\vec{l}_1 = l1(q1), \bar{l} \quad 1\cos(q1)) \tag{2}$$

Así mismo se encuentra la expresión vectorial del eslabón 2 como lo indica la Ec.3

$$\vec{l}_2 = l2(q1 + q2)\bar{l} \quad 2\cos(q1 + q2)) \tag{3}$$

Por lo tanto, los componentes del vector de posición $\vec{r}$, son la suma de los vectores$\vec{l}_1$y $\vec{l}_2$,de tal manera que x del vector de posición esta expresada en la Ec.4

$$x = l1(q1) - l2(q1 + q2) \tag{4}$$

De acuerdo con la Ec.4 se encuentra la expresión matemática par la componente y del vector manipulador.

$$y = \bar{l}\ 1\cos(q1) - \bar{l}\ 2\cos(q1 + q2) \tag{5}$$

Mientras las ecuaciones Ec.4 y Ec.5 están escritas en forma de matriz, con el cual se obtiene un modelo de cinemática directa necesario, en la Ec.5 se muestra la forma matricial.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 12, pp.144 - 158, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l1(q1) + l2(q1+q2) \\ \bar{l}\,1\cos(q1) - \bar{l}\,2\cos(q1+q2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Cinemática inversa

El problema en la cinemática inversa es encontrar los ángulos $q1$ y $q2$ siendo la posición final del manipulador un dato conocido, es decir sabemos cuáles son los valores de x y de y del vector $\vec{r}$ Tomando en cuenta la figura 1 se puede ver que el ángulo $q1$ cumple con la Ec.7

$$q_1 = \frac{\pi}{2} - a - w \quad (7)$$

Donde:
w = es el ángulo entre el vector de posición $\vec{r}$ y el eje $\vec{x}$
a=es el ángulo entre el vector de posición $\vec{r}$ y el vector $\vec{l}_1$.

Las longitudes de los vectores $\vec{l}_1$ y $\vec{l}_2$ ya son cantidades conocidas entonces se aplica la ley de cosenos para encontrar el valor del ángulo a. Al realizar el algebra correspondiente se tiene la Ec.8. para el ángulo entre el vector de posición $\vec{r}$ y el vector $\vec{l}_1$.

$$a = \cos^{-1}\left(\frac{l_1^2 - l_2^2 + x^2 + y^2}{2l_1\sqrt{x^2+y^2}}\right) \quad (8)$$

Por lo tanto, para encontrar una expresión matemática para el ángulo w se debe considerar que el coseno del ángulo w es el cateto adyacente dividido entre la hipotenusa. La cual se muestra en la Ec.9

$$w = \left(\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) \quad (9)$$

Se sustituyen las ecuaciones Ec.8 y Ec.9 en Ec.7 y tenemos la expresión para el ángulo q_1

$$q_1 = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1}\left(\frac{l_1^2 - l_2^2 + x^2 + y^2}{2l_1\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) \quad (10)$$

Por otro lado, solo hace falta aplicar la ley de los cosenos para el ángulo q_2 observando cuidadosamente la figura 1 se tiene la Ec.11

$$r_2 = l_1^2 + l_2^2 + \frac{2}{l}1l_2\cos(q2) \quad (11)$$

Se despeja q_2 de la Ec.11 para obtener la Ec. 12

$$q_2 = \cos^{-1}\left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l\ 1l_2}\right) \quad (12)$$

Finalmente se aplican las ecuaciones Ec.10 y Ec.12 un formato de matrices se tiene el problema de cinemática inversa resuelto.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\pi}{2} - \cos^{-1}\left(\frac{l_1^2 - l_2^2 + x^2 + y^2}{2l_1\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) \\ \cos^{-1}\left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l\ 1l_2}\right) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Aquí en la teoría es escribir las ecuaciones. De un modelo robótico.

$$\tau = \frac{d}{dt}\left(\frac{d\mathcal{L}}{d_q}\right) - \left(\frac{d\mathcal{L}}{dq}\right) \tag{14}$$

En donde:
τ es el torque aplicando a los motores
$\mathcal{L}$ es la diferencia de la energía cinética menos potencial del robot
$\dot{q}$ es la posición de los eslabones del robot

Para un eslabón la ecuación es (15)

$$\tau = (ml_1^2 + I)\ddot{q}_1 + mgl_{c1}\cos(q_1) \tag{15}$$

Mediante una técnica llamada variables de estado es fácil llegar a la ecuación (16).

$$\begin{bmatrix} \dot{x_1} \\ \dot{x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \left(\frac{1}{ml_1^2 + I}\right)(\tau - mgl_{c1}\cos(\mathrm{x1})) \end{bmatrix} \tag{16}$$

2.3 Desarrollo modelado robot 2GDL

Los robots manipuladores básicamente están constituidos por una cadena cinemática abierta. Esto es, sólo una sucesión de eslabones conectando los dos extremos de la cadena. Los eslabones se numeran a partir de la base del robot. La base se considera el eslabón 0, el primer elemento del robot es considerado el eslabón 1, hasta llegar al efector que es el eslabón n. Por tanto, un robot manipulador se modela como una cadena abierta de n+1 eslabones y n articulaciones.

Para que un robot ejecute una tarea específica primero se debe establecer la posición y orientación, su configuración con respecto a un marco de referencia inicial, Para realizar el control de movimientos uniformes es necesario el análisis de la velocidad y la aceleración, así como el análisis dinámico del robot

En la figura 6 se muestra un diagrama a bloques básico, control de movimiento del robot 2GDL (dos grados de libertad

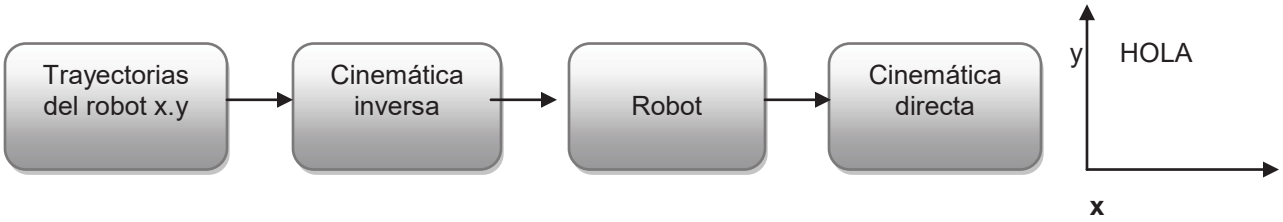


Figura 6. Diagrama a bloques Robot 2GDL

La cinemática es la ciencia del movimiento que estudia la posición, velocidad, aceleración y todas las demás derivadas de alto orden de las variables de posición con respecto al tiempo sin considerar las fuerzas que ocasionan u ocasionaron el movimiento y se divide en cinemática directa e inversa es necesario el análisis de la generación de trayectorias. Cuando se busca conocer la posición y orientación de un brazo robótico a partir de un conjunto de ángulos articulares, se le conoce como cinemática directa.

La cinemática directa es el estudio analítico del movimiento del robot con respecto a un marco de referencia inicial (X, Y) relacionando la dependencia que existe entre las coordenadas articulares, sus parámetros geométricos, coordenadas cartesianas y la orientación del efecto final del robot.

Por otro lado, la cinemática inversa consiste en: dada la posición y orientación del efector final del bazo robótico, calcular todos los conjuntos posibles del ángulo articulares que podrían utilizarse para obtener esta posición y orientación deseada. Se refiere a la generación de trayectorias ya que, dados los puntos deseados, la cinemática inversa calcula los ángulos necesarios para la trayectoria.

Para mover el brazo robótico desde una posición inicial hasta un punto deseado se debe aplicar un conjunto de funciones de pares de torsión. Hay diversos métodos para la obtención del modelo dinámico más utilizadas son Newton-Euler y Euler-Lagrange.

Con el método de Euler Lagrange solo se necesita la energía cinética y potencial del sistema y por método de Newton Euler se usa la segunda ley de newton que iguala fuerzas. Los brazos robóticos se controlan mediante actuadores que suministran una fuerza o un momento de torsión para ocasionar el movimiento de los eslabones. Por lo tanto, se necesita un algoritmo para calcular momentos de torsión que produzca el movimiento deseado.

El brazo planar está construido principalmente por dos eslabones rígidos es decir son dos elementos individuales que no cambian de tamaño entre sus extremos. La longitud del primer eslabón esta denotado por L_1y la del segundo eslabón está representada por L_2. El centro de masas de cada eslabón esta medido desde el extremo más cercano al origen están denotada por para el primer y el segundo eslabón respectivamente.

2.4 Modelo del manipulador robótico

Consideren un robot de dos grados de libertad en el plano horizontal. Se define un sistema de coordenadas cartesianas cuyo origen se selecciona en punto de intersección del eje de rotación de la articulación con el plano horizontal (x-y).

En el esquema de la figura 7$m_1$es la masa del eslabón 1; l_1 es la longitud del eslabón 1, I es la inercia del eslabón 1, $q_1$es la posición articular del eslabón 1, $m_2$es la masa del eslabón 2; l_2 es la longitud del eslabón 2, I_2 es la inercia del eslabón 2 q_2 es la posición articular del eslabón 2,

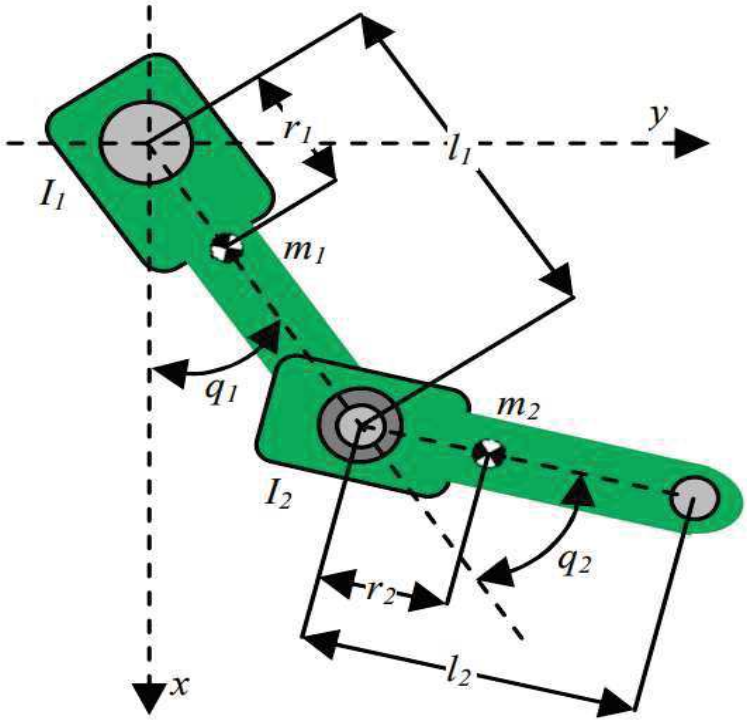


Figura7. Descripción geométrica del robot manipulador

Figura 8. Diseño en CAD de robot 2GDL.

El modelo cinemático de este manipulador que relaciona la posición del extremo operativo en el plano (x, y) con las variables articulares del robot q_1y q_2 viene dado por;

El robot 2GDL está constituido por dos articulaciones rotacionales que cada una otorga un GDL por lo tanto el brazo es de 2GDL, la primera articulación esta fija al origen y le es posible rotar al primer eslabón, la segunda articulación esta fija al extremo del primer eslabón y le es posible rotar al segundo eslabón. El ángulo que se forma entre el eslabón de longitud L_1 y L_2 y el marco de referencia X-Y es denotado por ϴ es decir, es el ángulo que tiene la primer articulación. La articulación que está caracterizada por el ángulo φ, está definida por el eslabón de longitud.

Las articulaciones son rotadas con Servo motores; consiste en un dispositivo electromecánico que con en un motor eléctrico, un juego de engranes y una tarjeta de control, todo dentro de una carcasa de plástico. Un servo tiene la capacidad de ser controlado en posición. Es capaz de ubicarse en cualquier posición dentro de un rango de operación generalmente de 180º pero puede ser fácilmente modificado para tener un giro libre de 360º. Los servos se suelen utilizar en robótica, automática y modelismo debido a su gran precisión en el posicionamiento.

Los servomotores funcionan por medio de modulación de ancho de pulso (PWM) Todos los servos disponen de tres cables, dos para alimentación Vcc y Gnd (4.8 a 6 [V]) y un tercero para aplicar el tren de pulsos de control, que hace que el circuito de control diferencial interno ponga el servo en la posición indicada.

La frecuencia usada para mandar la secuencia de pulsos al servomotor es de 50 Hz esto significa que cada ciclo dura 20 ms, Las duraciones de cada pulso se interpretan como comandos de posicionamiento del motor, mientras que los espacios entre cada pulso son despreciados.

Tabla 1 configuración de cables

Numero de cables	Color de cables	Descripción
1	Marrón	Cable de tierra conectado a tierra del sistema.
2	Rojo	Alimenta el motor normalmente se usa + 5V.
3	Naranja	La señal PWM se transmite a través de este cable para impulsar el motor.

TowerPro SG-90 características

- El voltaje de operación es típicamente + 5V
- Par de torsión: 2.5kg / cm
- La velocidad de operación es 0.1s / 60 °
- Tipo de engranaje: Plástico
- Rotación: 0 ° -180 °
- Peso del motor: 9gm
- El paquete incluye cuernos y tornillos.

Las medidas de longitud de los eslabones, así como las medidas de las distancias al centro de las masas y las masas de cada uno de los eslabones se encuentran concentradas en la **Tabla 2,** además de la notación de unidades de cada parámetro.

Tabla 2. Parámetros del modelo dinámico

Descripción	Notación	Valor	Unidades
Longitud del eslabón 1	L_1		m
Longitud del eslabón 2	L_2		m
Distancia del centro de masa (eslabón 1)	q_1		m
Distancia del centro de masa (eslabón 2)	q_2		m
Masa del eslabón 1	m_{11}		Kg
Masa del eslabón 2	m_{21}		Kg

Resultados de la simulación: Retomando las consideraciones descritas brevemente, se ha llevado a cabo las simulaciones de los modelos cinemático directo e inverso en la figura 7 se muestra el diagrama en Labview usado para la simulación de las trayectorias.

En el bloque Generador de trayectorias se encuentran las ecuaciones paramétricas que describen la trayectoria deseada, la ganancia y la rapidez con la que se dibuja la trayectoria.

Los ángulos necesarios para realizar dicha trayectoria se calculan en el bloque de “Cinemática inversa. En el bloque “Cinemática directa” se encuentran las ecuaciones que describen la posición del efecto final dados los ángulos.

2.5 Resultados de la simulación

El control PID una vez que es llevado a formato digital para su programación en diversos tipos de tarjetas de desarrollo, tiene una amplia flexibilidad y compatibilidad para diversos proyectos, este tipo de control tiene amplias variantes, siendo sus versiones MPID (PID-Multiterminos), FOPID (PID de orden fraccional), NPID (PID neuronal), FPID (PID de lógica difusa), estos ya se han implementado en dispositivos digitales, los cuales principalmente son, equipo de copudo basado en microprocesador y en PLC que son controladores industriales, de hecho los PLC cuentan con la librería PID, en cambio su implementación en Microcontroladores no ha sido muy difundida, debido a que muchos proyectos con controlados con códigos basados en instrucciones condicionales.

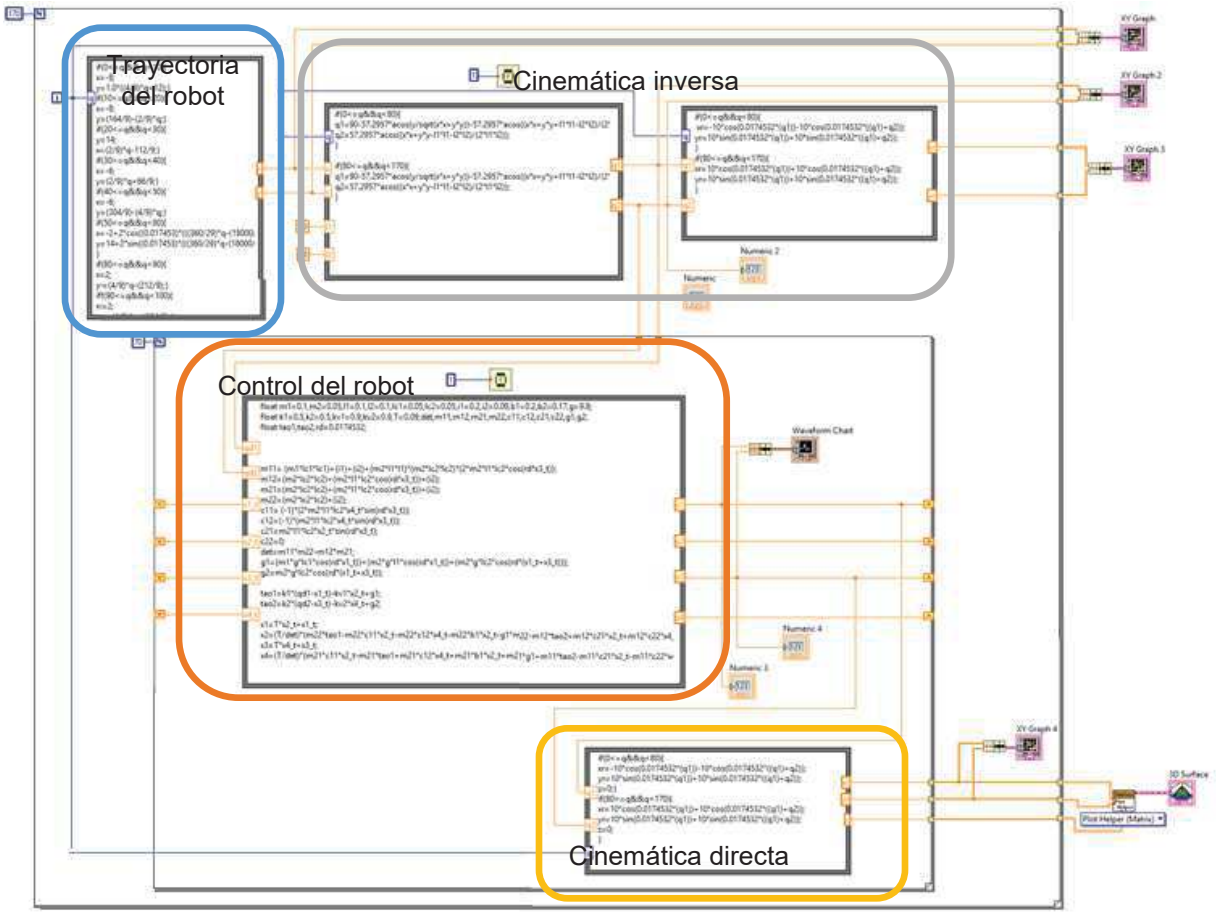


Figura 9. Muestra del diagrama en Labview usado para la simulación de las trayectorias

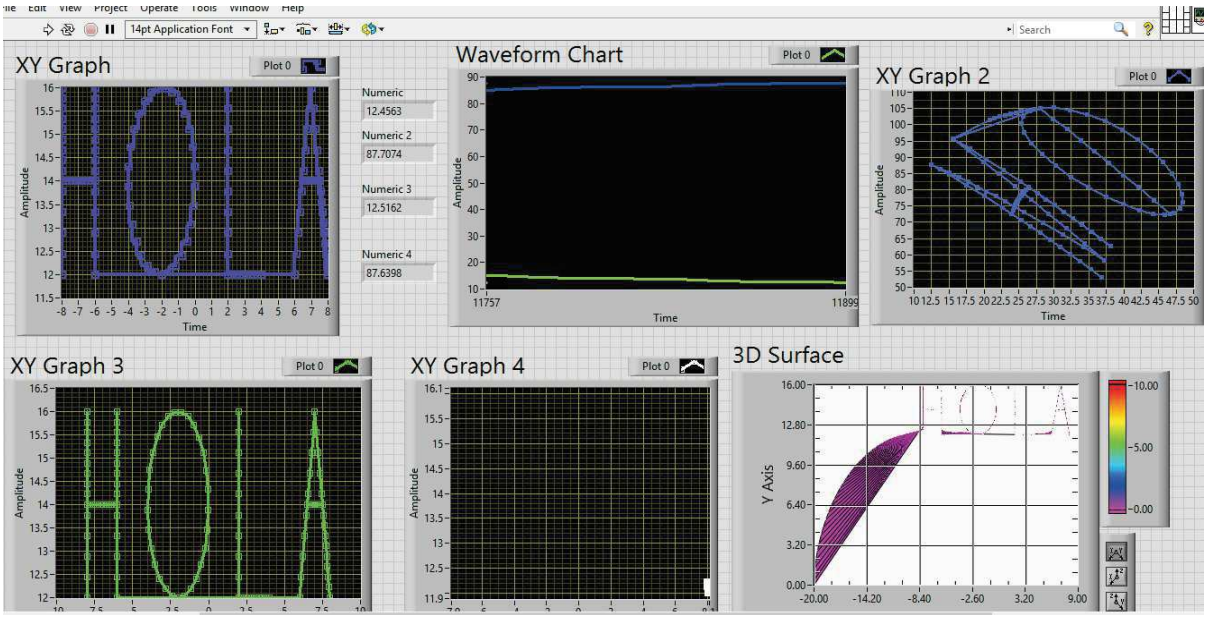


Figura 10. Simulacion en Labview de robot 2GDL

Este trabajo desarrolla la implementación del control PID paso a paso con el propósito de hacerlo entendible al lector, se ha mencionado que la tarjeta elegida es la STM32L476RG, dicha tarjeta de desarrollo requiere de al menos dos programas de software, uno es CubeMX disponible en http://stm32.com, y un entorno de desarrollo integrado (IDE), llamado System Workbench for STM32 basado en Eclipse, conocido como SW4STM32 o también como AC6, este IDE está disponible en Http://www.stm32.com/.

3. Resultados

Se observa los datos en el monitor Serial, el que se utilizó en este trabajo fue Tera Term, no obstante Termite también permite una buena visualización de las lecturas del robot. Que se muestran a continuación en la figura 11.

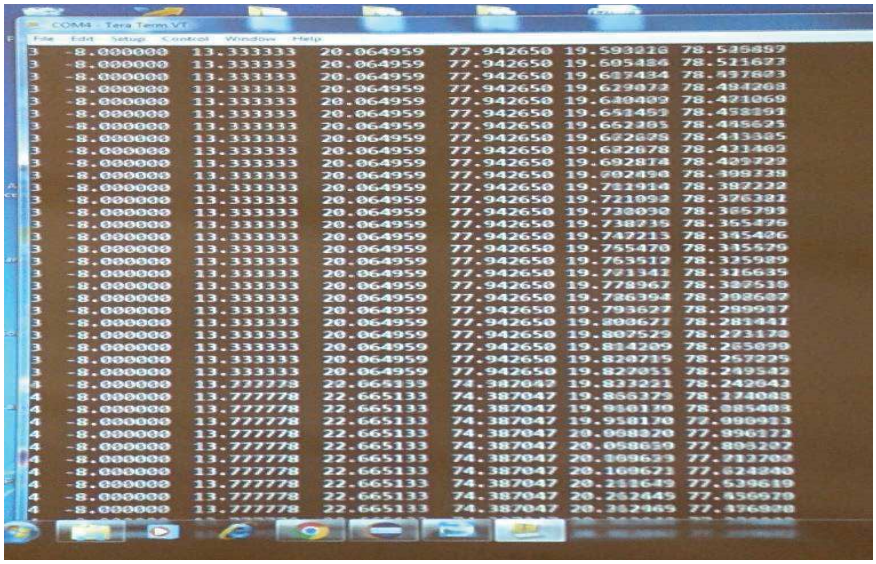


Figura 11. Lecturas del Robot de 2GDL en Tera Term

Se muestra el brazo de 2 GDL conectado a la tarjeta STM32L476RG listo para que pueda hacer su trayectoria adecuada véase en la figura 12. En la Figura 13 se observa la salida de la trayectoria trazada en un plano X-Y de un osciloscopio, en dicha imagen se aprecia que la trayectoria presenta un margen de error de acuerdo a los cálculos de $1x10^{-3}$ centímetros.

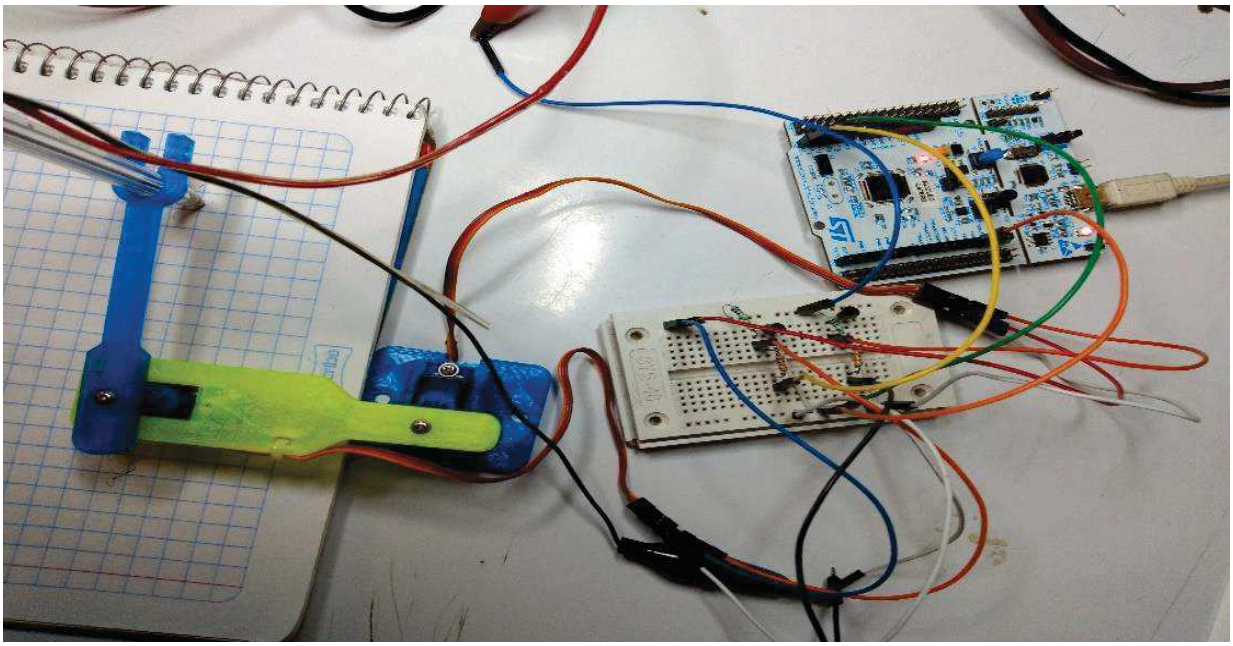


Figura 12. Brazo de 2 GDL conectado a la tarjeta STM32L476RG

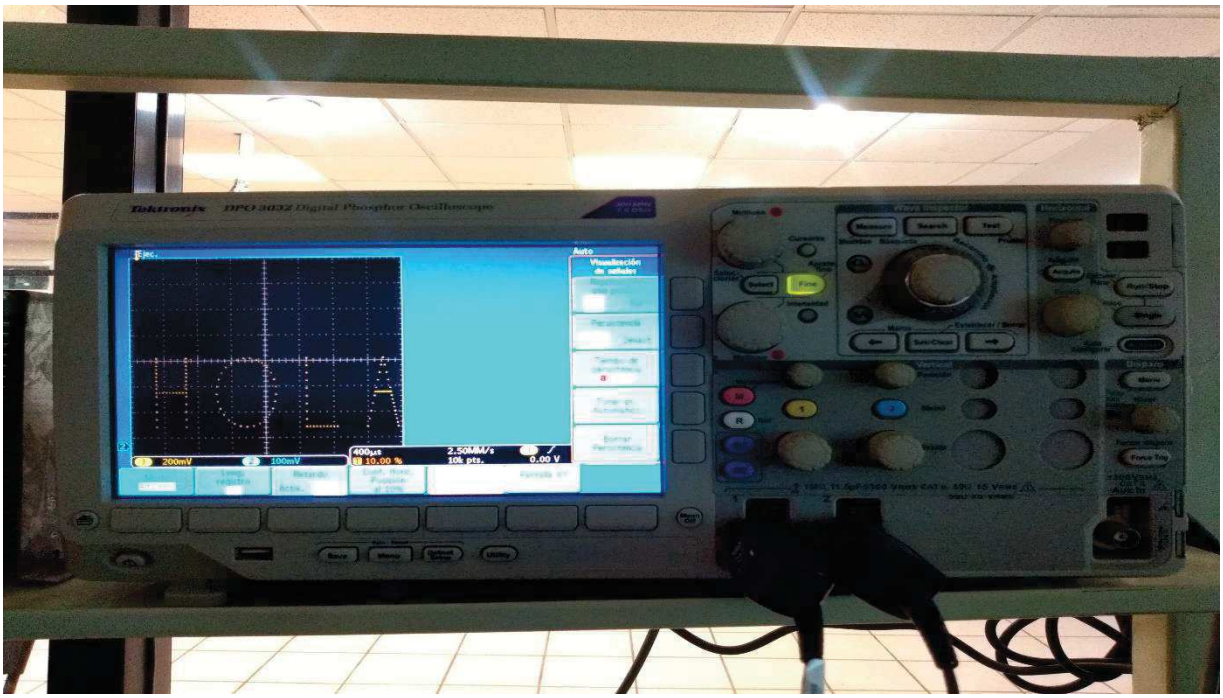


Figura 13. Vista de la palabra "HOLA" en osciloscopio con la tarjeta STM32L476RG

4. Conclusiones

En este trabajo se presentaron las trayectorias para poder escribir la palabra" HOLA" por medio del robot de 2GDL mediante el modelo, el paradigma de Takegaki y Arimoto, Euler Lagrange y cinemática directa e inversa y así como se muestra el procedimiento de su deducción a pesar de ser laborioso resulta ser sencillo de comprender. Por otro lado, la finalidad de comprender de mejor manera el movimiento de los eslabones del sistema modelado, se impusieron diferentes valores de torque para el eslabón 1 y el eslabón 2. Por lo cual permito observar la evolución de trayectoria con la ayuda del modelo cinemático asociado al punto (x, y).

Por otro lado, el robot fue ensamblado por completo por piezas que fueron construidas mediante una impresora 3D utilizando el software FreeCAD el cual facilito el objetivo del proyecto se cumpliera fácilmente. Finalmente, los sistemas que determinan la cinemática inversa tienen que ser muy precisos y con menos margen de error para hacer eficiente el uso del robot 2 GDL.

Referencias

[1] Sergey A. Filippov, Natalia G. Ten, Alexander L. Fradkov, Teaching Robotics in Secundary School: Examples and Outcomes, IFAC-PapersOnLine, Vol. 50, Issue 1 pp. 12167-12172, 2017.

[2]Ines Tejado, Juan Serrano, Emilio Peréz,Daniel Torres, Blas M. Vinagre, Low-cost hardware-in-the-loop testbed of a movile robot to support learnig in automatic control and robotics, IFAC-PapersOnLine, Vol. 79, Issue 6 pp. 246-247, 2016.

[3]Richa Sharma, Prerna Gaur, A. P. Mittal, Performance analysis of two-degree of freedom fractional order PID controllers for robotic manipulator with payload, ISA Transactions, Vol. 58, pp. 279-291, 2015.

[4]Pritesh Shah, Sudhir Agashe, Review of fractional PID controller, Mechatronics, Vol 38 , pp. 29-41, 2016.

[5]Mohit Jain, Asha Rani, Nikhil Pachauri, Vijander Singh, Alok Prakash Mittal, Design of fractional order 2-DOF PI controller for real-time control of heat flow experiment, Enginering Science and Technology an international Journal, 2018.

[6]Aleksei Tepljakov, Baris Baykant Alagoz, Celaleddin Yeroglu, Emmanuel Gonzalez S. Hassan HosseinNia Eduard Petlenkov, FOPID Controllers and their industrial applications: Asurvey of Recent Results, IFAC-PapersOnLine, Vol. 51, Issue 4, pp. 25-30, 2018.

[7]Long Jin, Shuai Li, Jigue YU, Jinbo He, Robot manipulator control using neural networks: A survey, Neurocomputing, Vol 285, pp. 23-34 2018.

[8]Haifeng Huang, Wei He, Shuang Zhang, Neural Network control of a robotic manipulator with time-varying output constraints by state feedback, IFAC-PapersOnLine, Vol. 50, Issue 1, pp. 8969-8974, 2017

[9]Jesus Adolfo Flores-Ordenana, Israel Ceron-Morales, Carlos Muñiz-Montero, Luis Abraham Sanchez-Gaspariano, Implementacion de controladores PID fraccionales en las plataformas STM32-Discovery y Arduino a partis de SIMUPLINK/MATLAB: parte 1, Visión Politécnica, Año 12 , No. 2, pp.8-12, 2017.

[10]Reyes Cortés, Fernando. Robótica: control de robots manipuladores, primera edición. Alfaomega Grupo Editor México, páginas: 592, marzo de 2011.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 13, pp.159 - 171, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Estado del Arte del Softrobot

Gudiño Márquez Jorge Wah-Hing, Gudiño Lau Jorge, Chavez Montejano Fidel, Charre Ibarra Saida y Durán Fonseca Miguel

Facultad de Ingeniería Electromecánica. Universidad de Colima
Km. 20 Carretera Manzanillo-Barra de Navidad.
Manzanillo, Col. México
jgudino1@ucol.mx, jglau@ucol.mx, fidel_chavez@ucol.mx.

Resumen

Actualmente las investigaciones del área de la mecatrónica están enfocadas a los robots suaves o blandos, ya que están cambiando el mundo de la robótica. Los robots blandos tienen una estructura suave, además son seguros y más confiables. En este artículo se describe el estado del arte, los alcances, sus aplicaciones, los conceptos generales de robots suaves o blandos, así como una clasificación de estos, su potencial, su problemática y su evolución a lo largo de la historia de los robots suaves o blandos. Además, se presentan los conceptos generales, así como una clasificación, su potencial y su interacción con el ser humano, para entender los robots suaves o blandos. Se analiza los robots blandos mostrando sus diferencias y ventajas contra los robots convencionales.

Palabras clave: Softrobot, actuadores neumáticos, pneunets, robots hiper-redundantes, robots blandos.

1. Introducción

El término “soft robot” está siendo utilizado para identificar a robots con características morfológicas y constitutivas no convencionales. Sin embargo, el concepto de suavidad, en este caso, puede ser muy amplio e incluso hacer referencia a características muy diferentes. El primer enfoque de la idea de suavidad, hace referencia a robots convencionales que han sido modificados para tener un comportamiento más seguro, dado que comparte espacio de trabajo con los seres humanos.

Sin embargo, un enfoque más revolucionario del concepto de suavidad, hace referencia a robots intrínsecante blandos, robots construidos por materiales cuyo módulo de elasticidad está en el orden de 102-106 P.a., es decir entre 3 y 10 órdenes de magnitud menos rígidos que los robots convencionales [1]. La unión de estos materiales con mecanismos que permiten variar su forma, modular su rigidez, cambiar las propiedades superficiales y/o facilitar la detección de formas; constituyen lo que se conoce hoy como un robot suave.

Los robots suaves son dispositivos constituidos por materiales polímeros, usualmente elastómeros, que le brindan características de deformabilidad a grandes escalas y alta flexibilidad comparados con su contraparte; los robots rígidos [7]. Es importante mencionar que los robots suaves no deben confundirse con robots flexibles, que a pesar de que son construidos con materiales metálicos, presentan pequeñas deformaciones.

Las características de los robots suaves hacen que este exhiba un comportamiento de un medio continuo, convirtiéndose en un sistema difícil de describir. Aunque, por otro lado, le brinda habilidades

para tomar formas complejas, adaptarse en el medio donde se desempeña, interactuar de forma segura hombre-robot y manipular objetos frágiles.

En el caso de robots rígidos, se puede hacer una distinción entre el actuador y los elementos mecánicos que componen el robot. Sin embargo para los robots suaves no es así, ya que el mismo dispositivo funge como actuador y robot al mismo tiempo. Esto origina una discrepancia entre llamarlos actuadores o robots suaves, aunque en este trabajo se ha decidido llamarlo robot suave.

2. Antecedentes e inspiracion biológica

El campo de la robótica suave es relativamente una nueva área de investigación en comparación con la robótica rígida clásica. Los robots blandos surgen debido a la necesidad de interacción entre los robots y un espacio dinámico y desconocido, que requiere de nuevas características. La robótica suave permite empezar a construir dispositivos más polivalentes y que el robot se adapte a distintos entornos. Anteriormente en la robótica clásica los robots estaban diseñados para trabajar en un espacio controlado y definido.

La idea de los robots blandos tiene ya su tiempo, aunque el término ha evolucionado con los últimos avances en robótica. Blando hace unas décadas quería decir deformable en cierta medida, pero fabricado por piezas más o menos rígidas, véase en la figura 1. Soft era una categoría que indicaba que el robot era capaz de modificar su estructura básica.

Figura 1. Articulación flexible.

Los nuevos robots blandos aproximadamente desde 2010, soft hace referencia a una generación de robots capaces de una deformación casi muscular. Cuentan con estructuras rígidas de distintos polímeros similares a los huesos, pero sus músculos o actuadores son más parecidos a sistemas de vejigas de gas. Estos robots pueden hacer avanzar con pasos agigantados la robótica, y constituir por sí mismos una nueva generación de robots. Son realmente baratos, resilientes, y usan tecnología existente desde hace décadas, que hoy día se ha abaratado bastante.

Los robots biológicos o robots completamente blandos, como ahora el adjetivo blando ya estaba en uso, lo siguiente era agregar completamente a la descripción. Nacen así los robots completamente blandos que no requieren de metal o polímeros rígidos. A fin de cuentas, en la naturaleza hay multitud de formas sin huesos, como el pulpo. Los robots suaves ofrecen un mecanismo más poderoso para interactuar de una manera fácil y efectiva con el entorno real. Es por ello que las aplicaciones desarrolladas, hasta el momento, están orientadas a la interacción directa y segura con los seres humanos, la locomoción en ambientes no estructurados y el agarre robusto y eficaz de objetos.

En el reino animal se encuentra un sin número de cuerpos con estructuras suaves y deformables, pero a la vez robustas. Diferentes especies han adaptado su estructura y forma al medio donde viven, tanto para movilizarse, como para alimentarse y protegerse de los predadores. Estas características han servido de inspiración a los diseñadores y desarrolladores de robots, quienes han decidido aprovechar las ventajas de la estructura física y anatómica de ciertas especies, como se observa en la figura 2.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 13, pp.159 - 171, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

La flexibilidad y estructura de los cuerpos, diseño de patas y garras, diseño de alas, capacidad de desplazamiento en superficies irregulares o extremadamente planas y capacidad de vuelo en condiciones complejas, son algunas de estas características. Estos robots están siendo utilizados en tareas de monitoreo aéreo, exploración del fondo marino, navegación remota para asistir en tareas de búsqueda y rescate, véase en la figura 3.

Figura 2. Aquajelly robot.

Otro modelo que ha servido como inspiración biológica para los desarrolladores de robots, es el cuerpo humano, que posee un conjunto de estructuras blandas y elásticas como el corazón, lengua, esófago y uno de los más grandes y notorios, la piel. La piel es un órgano del cuerpo humano que a pesar de ser blando y deformable es tan resistente como para proteger los órganos internos, y adicionalmente impermeable, y resiste altas temperaturas. Siendo uno de los órganos más extensos, la piel es de grosor variable según la zona que esté recubriendo, y totalmente dotado de un conjunto de sensores distribuidos de forma no homogénea en todo el organismo [8].

La sensación, protección y termorregulación son las que más atraen al momento de desarrollar membranas y polímeros que simulen el comportamiento de la piel humana, en el mismo caso que algunos animales se adaptan a estos cambios y capacidad de flexión para su protección, véase en la figura 2.3.

Figura 3. GoQBot.

3. Tipos de robots

En este apartado se hace una diferencia entre los tipos de robots más comunes haciendo mención de su configuración de articulaciones y su espacio de trabajo.

Primero, se definen los tipos de articulaciones de robots rígidos, como se muestra en la figura 4.

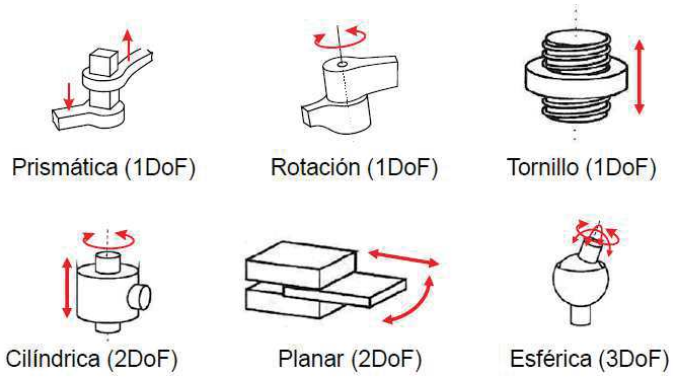


Figura 4. Articulaciones de los robots.

Con estas articulaciones se pueden construir distintos tipos de robots rígidos, de los cuales se presentan:

- Robot cilíndrico (RPP)
- Robot polar o esférico (RRP)
- Robot cartesiano (PPP)
- Robot articulado (RRP/RRR)
- Robot paralelo

4. Tipos de materiales

4.1 Plásticos

Materiales poliméricos orgánicos (compuestos por moléculas orgánicas gigantes) que son plásticos, es decir, que pueden deformarse hasta conseguir una forma deseada por medio de extrusión, moldeo o hilado. Las moléculas pueden ser de origen natural, por ejemplo la celulosa, la cera y el caucho (hule) natural, o sintéticas, como el polietileno y el nylon. Los materiales empleados en su fabricación son resinas en forma de bolitas o polvo, o en disolución.

4.2 Resinas

Las resinas epoxi se usan tanto en la construcción de moldes como de piezas maestras, laminados, extrusiones y otras ayudas a la producción industrial. Los resultados son más baratos, resistentes y rápidos de producir que los hechos de madera, metal, etc. Los compuestos de fibras y epoxi, aunque son más caros que las resinas de poliéster o de éster de vinilo, producen piezas más resistentes.

4.3 Látex

Este es el material más común utilizado para la restauración estética. El látex es un elemento que se encuentra en estado líquido y se prepara con algunos aditivos como el alginato y algunas pinturas vegetales. Con este material se hacen generalmente los guantes de prótesis. Este material tiene la ventaja de ser bastante ligero y económico pero se puede marchar con mucha facilidad, algunos pacientes dicen que carece de realismo estético y sensorial comparado con otros materiales.

4.4 Silicona

La silicona ha existido por mucho tiempo, pero solo recientemente se ha utilizado para la restauración de miembro superior. El proceso de restauración con silicona es más complejo que con látex y PVC, pero a menudo ofrece mayor realismo y restauraciones duraderas. Este material no mancha como el látex pero es más pesado, se puede utilizar en cierto tipo de prótesis, es más costoso y tiene procesos de fabricación más largos.

5. Tipos de mecanismos

Para la transmisión de movimientos en las articulaciones de manos robóticas y prótesis de mano normalmente se utilizan mecanismos que permitan flexionar o tensionar las falanges en los dedos. Considerando que un mecanismo es un dispositivo que transforma un movimiento y una fuerza de entrada en otra de salida. Entre estos mecanismos están la transmisión por barras, motores instalados en cada articulación y transmisión por poleas.

5.1 Mecanismo de barras

Este tipo de mecanismo es muy utilizado para construir prótesis robóticas, consiste en la transmisión de movimientos a las falanges instalando barras conectadas a los mismos en una configuración adecuada, con este mecanismo se elimina el empleo de motores para dar movimiento a las articulaciones y es fácil de manufacturar. En la figura 5, se muestra un mecanismo de barras sencillo de implementar pero que limita los movimientos, ya que la flexión se produce al tiempo en las 3 articulaciones.

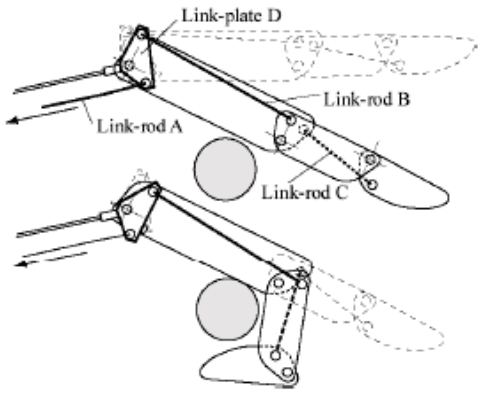


Figura 5. Mecanismos de barras rígidas.

Este tipo de mecanismo es utilizado en la mano MCU-1 desarrollada por la Universidad Militar Nueva Granada, donde las articulaciones se mueven a través de una estructura de barra y un tornillo sin fin acoplado a un motor, véase en la figura 6. en la cual se muestra la estructura de barras de esta mano.

Figura 6. Dedo índice mano MCU-1.

5.2 Mecanismo con motor en cada juntura

Es muy utilizado en manos robots. Consiste en ubicar motores pequeños o micromotores en cada una de las articulaciones rotacionales de una cadena cinemática, pero que conlleva a aumentar costos por el número de motores que se debe utilizar y además de incrementar el peso del mecanismo.

Algunos manos que utilizan este tipo de mecanismos son: la mano NTU en la cual las articulaciones son movidas a través de motores y un juego de engranajes que se encuentran en las falanges de los dedos, la mano HIT/DLR Dexterous donde todos los actuadores se integran en la base de dedo y el cuerpo de dedo y la prótesis I-LIMB que tiene un motor por dedo que mueve las dos articulaciones activas (MCP y PIP). En la figura 7 se muestra el dedo de la mano DLR y el dedo de la mano I-LIMB

A B

Figura 7. A) Dedo de la mano HIT/DLR Dexterous, B) dedo mano I-LIMB.

5.3 Transmisión por poleas

Para la transmisión por poleas las cuerdas de transmisión de todas las poleas deben ir unidas en un punto fijo a las respectivas poleas para así evitar deslizamientos y lograr que el movimiento se transmita, este tipo de transmisión aplicado a un dedo mecánico se muestra en la figura 8. En la figura se observa un esquema que permite observar el funcionamiento de este mecanismo.

La ventaja de este sistema de transmisión radica en la reducción del peso de la mano, además de que es fácil de implementar. La transmisión mediante poleas es como sigue: cuando el eje de una máquina motriz (motor) gira a una velocidad de rotación *n*, una polea que se encuentra solidaria, enchavetada, atornillada o soldada, al mismo, también gira a la misma velocidad de rotación *n*, y la velocidad tangencial *v* en la periferia de la polea dependerá del radio de la misma.

Esta polea puede transmitir, por fricción o a través de una correa o cuerda, su movimiento a otra polea que esté montada sobre el eje de otro mecanismo receptor del movimiento, el cual según sea la relación de transmisión, podrá adquirir menor, igual o mayor velocidad de rotación que el primero. La polea que transmite el movimiento se denomina motora o conductora, en tanto que la que recibe el movimiento recibe el nombre de conducida.

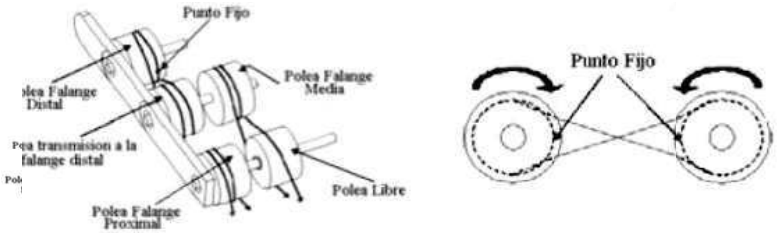


Figura 8. Descripción del sistema de poleas para la generación de movimientos.

La mayoría de prótesis y manos robóticas utilizan este tipo de mecanismo también conocido como sistema de tendones, entre ellas tenemos la mano RTRII y la mano Utah/MIT, véase en la figura 9.

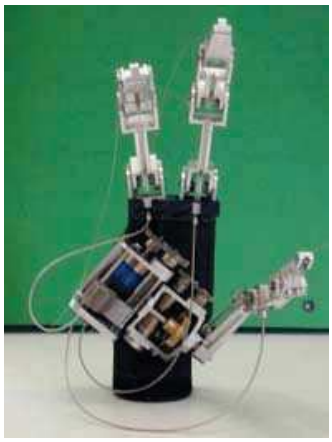


Figura 9. Mano RTRII.

6. Tipos de actuadores

La mayoría de los actuadores convencionales contienen componentes rígidos que limitan su capacidad de deformación, sin embargo, un actuador blando debe poder deformarse junto con la estructura. La utilización de actuadores suaves resulta importante ya que un solo actuador suave permite generar varios grados de libertad, y adicionalmente permite imitar el biomovimiento.

La actuación es necesaria para cumplir tareas que incluyen movimiento, cambio de rigidez y cambio de las propiedades superficiales. Los actuadores suaves pueden agruparse dentro de dos grandes familias, la eléctrica y la neumática.

6.1 Actuadores eléctricos suaves

6.1.1 Polímeros electroactivos

Los actuadores de polímeros electroactivos (EAP) son dispositivos fabricados con materiales "inteligentes" capaces de sufrir deformaciones en respuesta a estímulos eléctricos adecuados. Poseen propiedades funcionales y estructurales como: grandes fuerza a tensión, alta densidad de potencia,

alta elasticidad mecánica, simplicidad estructural, versatilidad, escalabilidad, libre de ruido acústico, y en la mayoría de los casos son de bajo costo [2]. Los EAP se clasifican comúnmente en dos grandes familias: los EAP iónicos (activados por un transporte inducido eléctricamente de iones y / o moléculas) y los EAP electrónicos (activados por fuerzas electrostáticas). La Tabla 1 muestra ejemplos clasificados de diferentes EAP, junto con las referencias más relevantes.

EAP iónicos: La principal ventaja de los EAP iónicos es su capacidad de respuesta a voltajes extremadamente bajos (en el orden de 1V). Como inconveniente, tienen un desempeño limitado por una vida corta y tiempos de respuesta altos. Esto se debe principalmente al proceso electroquímico de los mecanismos de transducción de energía subyacentes, los cual conduce a la degradación del material y la reducción de la velocidad de respuesta [3].

EAP electrónicos: Los EAP electrónicos se basan en materiales que responden a un campo eléctrico. La principal ventaja es la posibilidad de lograr grandes fuerzas a tensión y compresión, tener una respuesta rápida y larga vida útil. Una desventaja potencial es que los actuadores electrónicos actualmente requieren campos eléctricos de altos (hasta el orden de 100 V μm-1) debido a la naturaleza electrostática de sus mecanismos de activación.

La reducción de la magnitud del campo eléctrico (a través de mejoras materiales, como el aumento constante dieléctrica) podría ampliar la aplicabilidad en esta área, debido a la necesidad de altos voltajes (en el orden de 1 kV). Otro inconveniente es la necesidad de un marco rígido donde estirar el material y una necesaria mejora en los electrodos que actualmente se utilizan para su diseño [4].

6.1.2 Actuadores neumáticos suaves

PneuNets: Los actuadores elastométricos accionados neumáticamente son de interés en la robótica suave ya que son capaces de proporcionar un movimiento no lineal [6]. PneuNets es un actuador suave compuesto de una serie de canales y cámaras dentro de un elastómero, estos canales se inflan al ser presurizados, creando movimiento. El movimiento se controla modificando la geometría de las cámaras embebidas. Cuando se aplica aire presurizado al actuador la expansión se produce en las regiones menos rígidas [6].

Los PneuNets son suficientemente resistentes permitiendo sostener una frecuencia intermedia (4Hz), y producir movimientos de gran amplitud en ciclos repetidos y sin fallos. Su comportamiento es el siguiente: a menor presión, se doblan formando un círculo con todas sus cámaras infladas uniformemente, mientras que a mayor presión se dobla sobre sí mismo, al inflar primero las cámaras superiores [6].

McKibben: Conocido también como PAM o músculo artificial neumático, es un dispositivo contráctil, que al aplicarle aire presurizado es capaz de generar fuerzas y desplazamientos no lineales [5]. Físicamente es un músculo trenzado, cilíndrico, de forma helicoidal, que tiene a ambos lados tubo y funda, accesorios que no sólo sirven para tensionar la fibra de transferencia, sino también para el ingreso y cierre del fluido del gas [9]. Estos actuadores pueden alcanzar una magnitud de carga similar a la de un músculo, pero poseen un solo modo de actuación, la contracción [10]. Su comportamiento dinámico y costo reducido son ventajas frente a otros modelos de actuadores neumáticos suaves.

Los músculos artificiales neumáticos fueron inventados en la década de los 50 para utilizarlos en ortopedia, fueron desarrollados primero con el nombre de “McKibben Artificial Muscles”. Estos actuadores consisten en una cámara de aire elastomérica cubierta por una malla trenzada, sujeta por los extremos. Cuando la cámara elastomérica interna es sometida a aire a presión esta se infla y tiende a incrementar su volumen. Debido a la poca elasticidad de la malla trenzada el actuador se contrae a la vez que su volumen aumenta, como se observa en la figura 10.

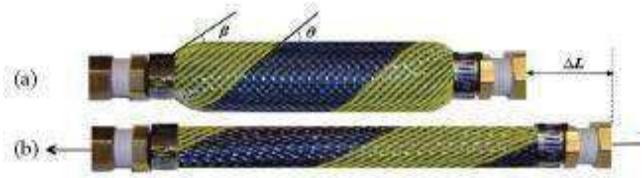


Figura 10. Músculo artificial neumático (a) Contracción neumática. (b) Estado de reposo.

Los músculos neumáticos artificiales tienen propiedades similares a las de un músculo orgánico, son ligeros, fáciles de fabricar, tienen una contracción máxima y curvas de carga y longitud similares al músculo humano. Por lo tanto estos músculos artificiales satisfacen la necesidad de seguridad, sencillez y ligereza que la interacción entre humanos y robots requiere. Por ello son utilizados en aplicaciones médicas y biorobóticas.

7. Enfoque de robots

Eslabones rígidos: Ampliamente utilizado en robots rígidos para describir movimientos de juntas rotacionales y prismáticas, sin embargo, si se utiliza un número relativamente grande de cuerpos, se pueden describir estructuras elásticas .

Curvatura constante: Apoyado de 3 parámetros (curvatura, longitud de arco y ángulo de azimut) permite describir la cinemática de cuerpos que pueden flexionarse, extenderse y contraerse considerando que existe un eje central en el cuerpo, de esta manera se puede integrar mas de un solo movimiento de estos tipos.

Curvatura variable: Este último enfoque cinemático resulta ser más adecuado para describir la curvatura de un cuerpo, ya que en principio ésta no es constante. Este enfoque se apoya de una variable s que parametriza la longitud a lo largo del segmento y define la curvatura para cada punto sobre ella, adaptándose a las longitudes y aplicaciones.

Parámetros concentrados: Se basa en la unión de elementos compuestos por resortes, amortiguadores y masas para modelar el comportamiento del robot continuo [11]. A partir de estos parámetros concentrados se obtienen las ecuaciones de movimiento (EDM) mediante las ecuaciones de Newton-Euler o por métodos de energía.

Métodos de energía: Están basados en el Principio de Trabajo Virtual y la ecuación de Euler-Lagrange en donde se define una función que minimiza la energía o bien parámetros concentrados para encontrar las EDM.

Teorías de elasticidad: En este enfoque se basa en las teorías de barra de Bernoulli-Euler y Cosserat-rod, véase en la figura 11.

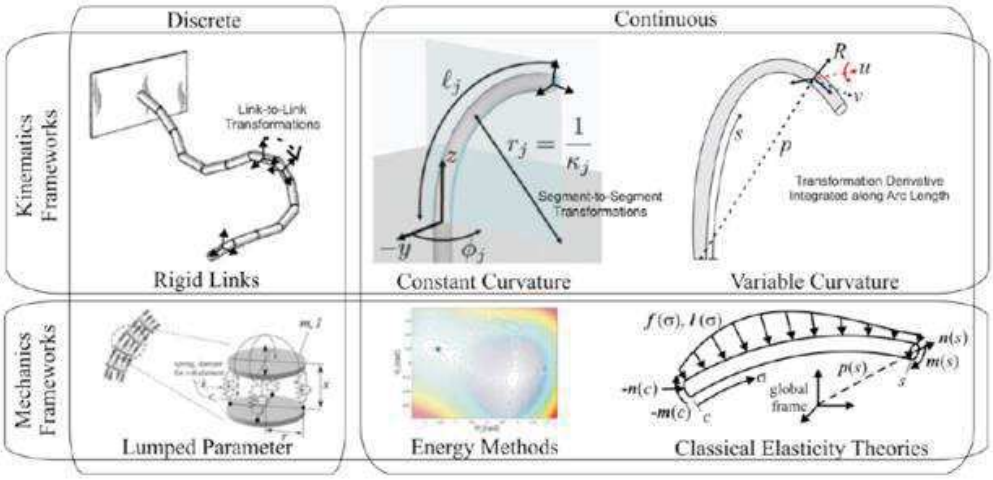


Figura 11. Enfoque de Soft Robot.

8. Variación de movimientos

Flexión: Al envolver el refuerzo de fibra en una configuración simétrica de doble hélice, se evita que el actuador se expanda radialmente y solo se puede expandir axialmente. La adición de una lámina limitadora de tensión de material inextensible evita esta expansión en un lado del actuador, lo que resulta en un movimiento de flexión general.

Extensión: De nuevo, una envoltura simétrica de doble hélice limita la expansión radial. Sin embargo, en esta configuración no agregamos una capa inextensible y, como resultado, el actuador se expandirá en la dirección axial cuando se infla.

Torsión: Mediante el uso de una envoltura helicoidal única en lugar de una envoltura helicoidal doble simétrica como en los 2 casos anteriores, se puede lograr un movimiento de torsión. A medida que el núcleo de elastómero se expande, la hélice de la rosca también aumenta de diámetro. Pero como el hilo es inelástico y de longitud fija, el aumento del diámetro debe compensarse con una reducción en el número de bobinas, lo que resulta en un movimiento de giro opuesto a la dirección de la envoltura del hilo.

9. Anatomía de una mano

Para soportar cómodamente la flexión y extensión de la mano, los actuadores blandos deben seguir el rango de movimiento de un dedo natural y generar la fuerza adecuada para realizar el movimiento apropiado. Una serie de estudios manuales en la parte del estado del arte proporcionan mediciones sobre el rango de movimiento de las articulaciones de los dedos.

En función de estas mediciones, los actuadores blandos deben tener tres grados de libertad de flexión “DOF” para cada dedo (es decir, índice, medio, anular y meñique). De manera similar, se necesitan al menos dos "DOF” flexores (en el dedo pulgar), para permitir el agarre, como se muestra en la figura 12.

La suma de los ángulos de la articulación se midió en aproximadamente 250° y 160° para el dedo medio y el pulgar, respectivamente, estos resultados se encuentran dentro del rango de movimiento de las articulaciones reportado en la literatura y se puede generalizar a otros tamaños de mano.

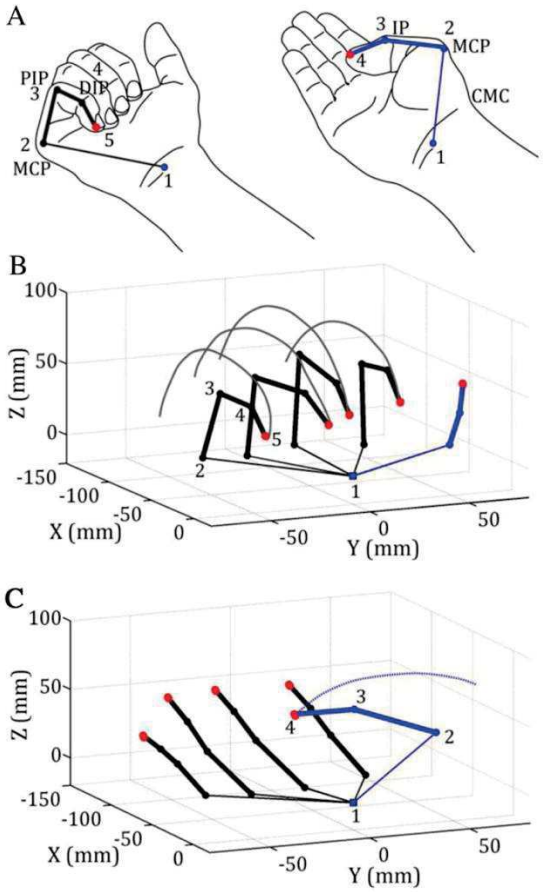


Fig. 12. Análisis de una mando.

De igual manera en estudios previos sobre el agarre a mano han registrado que un individuo sano puede generar una fuerza máxima de agarre de hasta 300 y 450 N en los casos de mujeres y hombres adultos, respectivamente. Sin embargo, en casos donde hay deterioro de la mano, estos valores de fuerza se reducen drásticamente.

10. Diseño de un actuador SoftRobot

El diseño en la ingeniería es una tarea muy importante, compleja, dinámica e integradora, para este proyecto se toman en cuenta los requisitos computacionales, mecánicos, electrónicos y funcionales para lograr tener éxito en diseñar un robot suave.

Se describe la configuración particular del componente, completa con modelos sólidos y dibujos de ingeniería del componente y moldes relacionados. Para permitir la personalización de diseños, estos archivos se complementan con diseñar actuadores y piezas de molde en un entorno de modelado sólido. Esta sección también contiene información sobre selección de materiales y principios generales de diseño, proporcionando información sobre las consideraciones de diseño que deben realizarse para personalizarlo para aplicaciones específicas.

Predecir el rendimiento de un actuador suave o un diseño de sensor blando no es sencillo debido a las morfologías complejas, el comportamiento elástico no lineal y los múltiples grados de libertad, por lo tanto dependiendo la aplicación, uso y diseño será como se aplique la metodología de diseño y construcción de este mismo, como se muestra en la figura 13.

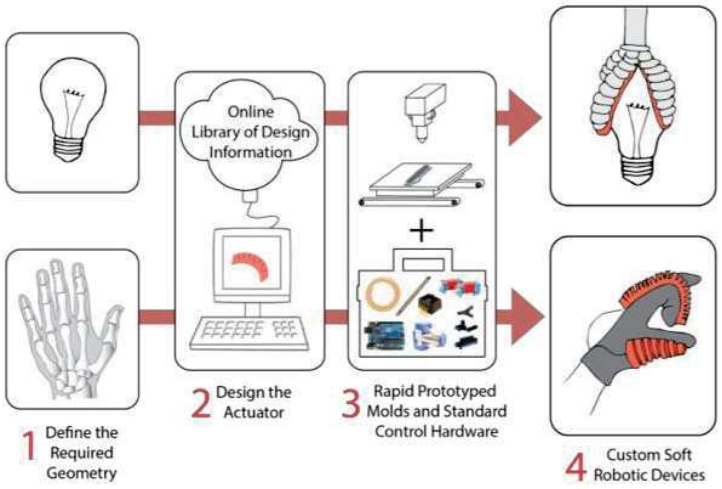


Figura 13. Diseño de un robot suave

11. Conclusiones

Con la realización de este documento se obtuvieron aprendizajes tales como el análisis y el diseño de un Softrobot (robot suave o blando), es decir la arquitectura y el mecanismo con el cual se basa el principio de movimientos de un robot suave, de igual manera se describen los actuadores PneuNet con forme a las dimensiones estándares de las manos. Se analiza los robots blandos mostrando sus diferencias y ventajas contra los robots convencionales. Estos son más hábiles de adaptarse a ambientes de trabajos irregulares, complejos y tienen tolerancias a fallas.

Se muestra la clasificación con respecto al funcionamiento, tipo de actuador, forma, adaptación, dimensión y materiales a usar. Dando lugar a mejorar el diseño de los actuadores, los accionamientos y el control que este tiene. Mostrando el estado del arte, sus ventajas, las complexiones de los nuevos robots, principales problemáticas y metodologías para de esta manera servir de guía para adentrarse en este campo de investigación.

12. Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima, y al PFCE 2019 que me apoyaron para la realización de esta investigación, elaboración y pruebas de este proyecto.

Referencias

[1] Majidi C., “Soft Robotics: A Perspective—Current Trends and Prospects for the Future”, Mary Ann Liebert, Inc. 2014.
[2] F. Carpi and E. Smela. “Biomedical Applications of Electroactive Polymer Actuators” 2009.
[3] Y. Bar-Cohen, S. Sherrit and S. -.Lih. “Characterization of the electromechanical properties of EAP materials”. Proc SPIE Int Soc Opt Eng. 2001.
[4] F. Carpi, R. Kornbluh, P. Sommer-Larsen and G. Alici. “Electroactive polymer actuators as artificial muscles: Are they ready for bioinspired applications?” Bioinspiration and Biomimetics. 2011.
[5] S. Kim, C. Laschi and B. Trimmer. “Soft robotics: A bioinspired evolution in robotics”, Trends Biotechnol. 2013.

[6] G. Nikolakopoulos, S. Manesis and G. Andrikopoulos. “Pneumatic artificial muscles”. Control Eng. 2013.
[7] Trivedi D. “Soft Robotics: Biological Inspiration, State of the Art, and Future Research”. Applied Bionics and Biomechanics Volume 5, Pages 99-117, 2008
[8] Pfeifer R “The Challenges Ahead for Bio-Inspired ‘Soft’ Robotics”, communications of the acm, 2012
[9] Frank D. & Lefeber D., “The Concept and Design of Pleated Pneumatic Artificial Muscles”, International Journal of Fluid Power, 2001.
[10] Robert F, “Multigait soft robot”, PNAS, 2011.
[11] Giri, N. & Walker, I. “ Continuum robots and underactuated grasping” Mech. Sci., pag 51-58, 2011.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 14, pp.172 - 185, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Diseño del Control para un Sistema Domótico por medio de la Diadema Emotiv Epoc+

Cordova Alvarez Luis Andres, Guzmán Moya Dayanna Gissel, Gudiño-Lau Jorge, Alcalá Rodríguez Janeth y Charre Ibarra Saida

Facultad de Ingeniería Electromecánica. Universidad de Colima
Km. 20 Carretera Manzanillo-Barra de Navidad.
Manzanillo, Col. México
jglau@ucol.mx

Resumen

En el presente artículo se muestra el funcionamiento de la diadema Emotiv Epoc, como dispositivo de detección neuro-eléctrica que capta y amplifica ondas cerebrales generadas por diferentes "acciones" mentales. *para el control de una instalación domótica, dicho control es desarrollado mediante la utilización del software Matlab®. Además, se realiza la lectura y clasificación de las señales recibidas por la diadema en base a los movimientos faciales (gestos) ejecutados por el usuarios y la configuración de dichas señales como comandos para el control de la instalación domótica.*

Palabras clave: Sinapsis, electroencefalograma, sistema de interfaz cerebro-computadora, domótica y automatización.

1. Introducción

El origen de las tecnologías BCI (Brain Computer Interfaces) o ICC (Interfaz cerebro computadora) nació con el descubrimiento de la naturaleza eléctrica del cerebro. El científico Richard Caton en 1875 usó un galvanómetro para observar impulsos eléctricos en la superficie del cerebro vivo de algunos animales. Años más tarde, Hans Berger dio continuidad al trabajo de Caton y consiguió registrar la actividad cerebral mediante la electroencefalografía siendo en 1924 el primero en registrar una EGG (electroencefalografía) de un cerebro humano.

El potencial médico de la tecnología BCI quedó patente a finales de los 90 mediante la implantación de un electrodo en el córtex motor de un paciente que presentaba parálisis por debajo de su cuello y había perdido la facultad del habla, de forma que el paciente era capaz de comunicarse moviendo un cursor en un ordenador. [1]

Las ICC se pueden definir como una serie de circuitos electrónicos y programas computacionales que monitorean la actividad eléctrica de las funciones cerebrales, que van desde el centro sensorial a los dominios de control de motores. [2]

Las señales cerebrales se obtienen mediante un EEG (Electroencefalograma), dado que varias de sus características y formas de onda se relacionan con procesos cerebrales conocidos éstas pueden ser generadas espontáneamente por el usuario o inducidos con la ayuda de estímulos visuales o sonoros. Los EEG se clasifican según su método de adquisición: invasivo, parcialmente invasivo y no invasivo. El tipo más común es el no invasivo, el cual, captura la señal del EEG por medio de electrodos (o canales) que se encuentran en diferentes lugares en el cuero cabelludo del usuario, lo anterior se muestra en la figura 1. [3]

Figura 1. Electroencefalograma no invasivo para pruebas de sistemas ICC. [3]

Durante los últimos años uno de los campos más investigados en conjunto con la biomedicina han sido las ICC. Las ICC son especialmente relevantes para pacientes que sufren de trastornos de movimiento: parálisis grave, esclerosis lateral amiotrófica, o síndrome de locked-in, donde hay poca o ninguna capacidad de control de movimiento residual. Sin embargo, aún con esta tecnología en desarrollo, en México, muchos sitios de atención médica para este tipo de padecimientos no cuentan con un sistema BCI que, si bien no es necesario en determinadas ocasiones, sí que resulta ser útil cuando el paciente tiene dificultades para expresarse o realizar alguna acción en consecuencia de su padecimiento.

La propuesta en este artículo es desarrollar un proceso eficiente para interpretar con determinado grado de exactitud las señales recibidas, por medio de la diadema Emotiv Epoc+. Una vez logrado esto, utilizar el sistema desarrollado para controlar un robot de tipo manipulador.

2. Evolución de la Domótica

En 1966 se comercializa el primer dispositivo capaz de controlar varias tareas del hogar por sí solas. Se trata de un ordenador del tamaño de una habitación llamado ECHO IV. Era capaz de controlar la televisión, la temperatura del hogar o programar el despertador, entre otras tareas. A pesar de ello, resultaba muy aparatoso por el gran espacio que ocupaba y por la dificultad de uso. Por esa razón el producto nunca llegó a triunfar y quedó como un intento memorable.

A partir de los años 90 se popularizan servicios como la teleasistencia, conectada a centralitas remotas. Este tipo de servicios vieron su esplendor gracias al “boom” de Internet en 1998, que permitió mejorar una gran cantidad de servicios.

Desde ese momento hasta el año 2006, e incluso hasta la actualidad, todos los electrodomésticos del hogar han ido adaptándose al Internet de las Cosas. Es decir, se han adaptado para poder conectarse a Internet de modo que muchos cuenten con funciones remotas y se adapten a determinadas variables, ya sean predeterminadas o modificables. Un ejemplo son los aires acondicionados que según la previsión del tiempo en determinadas páginas web adaptan la humedad y temperatura del hogar.

Si bien Internet revolucionó el mundo en 1998, la aparición del primer smartphone revolucionó Internet en 2007. Desde entonces todos los servicios del hogar y de la vida cotidiana se han pensado en torno a las ventajas de los dispositivos inteligentes.

Así pues, desde que llegase el primer smartphone hasta hoy en día han surgido infinidad de aplicaciones e interfaces que permiten hacer todo lo que un usuario se pueda imaginar. No en vano, en la actualidad una casa se puede controlar casi en su totalidad desde el móvil.

3. Aplicaciones de los sistemas BCI

3.1 Control de Robots

Un área en particular de ICC que ha recibido mucha atención y desarrollo en los últimos años es la capacidad de controlar robots humanoides con la ayuda de señales cerebrales directamente en una interfaz con la máquina, así también como la réplica del comportamiento cerebral humano en un cerebro artificial, véase figura 2. [4]

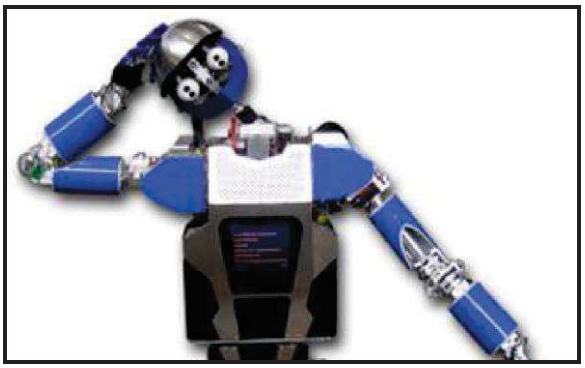


Figura 2. Parte superior del robot humanoide ARMAR III. [4]

Con el enfoque "Entender el cerebro mediante la creación de Cerebro" se expone que la única manera de entender completamente los mecanismos neurales en un sentido riguroso es por medio de su reproducción en cerebros artificiales.

Un robot humanoide controlado por un cerebro artificial, que se implementa como software basado en modelos computacionales de las funciones cerebrales, parece ser la dirección más plausible para este propósito, dada la tecnología disponible actualmente, además de abrir al futuro una amplia gama de posibilidades de aplicación al incluir en los robots elementos de aprendizaje artificial básicos ("Aprendizaje por Observación", "Aprendizaje por Imitación ", y " Aprendizaje por Demostración "). [5]

3.2 Instalaciones domóticas

En el proyecto “Brain Computer Interfaces for cognitive training and domotic assistance against the effects of ageing”, financiado en la convocatoria de proyectos Cero de la Fundación General del CSIC, se pretende desarrollar nuevas aplicaciones asistidas por medio de sistemas ICC basados en imágenes motoras y en potenciales P300.
Estas aplicaciones permitirán entrenar diferentes procesos cognitivos y controlar múltiples dispositivos de climatización, calefacción, iluminación, entretenimiento (TV, DVD, equipos de música, etc.) y de comunicación (control del teléfono). [6]

3.3 Comunicaciones

Las aplicaciones orientadas a facilitar la comunicación se han desarrollado a partir de sistemas ICC, que presentan al usuario las letras del abecedario en forma de matriz o de teclado de ordenador. El usuario forma palabras y frases mediante la selección de las letras que las conforman, como se muestra en la figura 3. [6]

Figura 3 Teclado virtual para interfaces cerebrales. [6]

4. Marco conceptual de Electroencefalograma (EEG)

4.1 Sinapsis

La sinapsis es una unión funcional intercelular especializada entre neuronas, donde se lleva a cabo la transmisión del impulso nervioso, el cual se inicia con una descarga química que origina una corriente eléctrica en la membrana de la célula. La membrana de la célula contiene canales iónicos donde iones de sodio (Na+), potasio (K+), y cloruro (Cl-) y Calcio (Ca-) se concentran durante los procesos químicos en la célula. La concentración de iones crea diferencias de potencial en la membrana. Los cambios de tensión en la membrana generan potenciales post sinápticos los cuales causan el flujo eléctrico a lo largo de la membrana y las dendritas. Cuando la diferencia de potencial es sumada en la zona de activación del axón alcanza el rango de los -43mV se dispara el axón mediante la generación de un potencial de acción en los +30mV que va a lo largo del axón para liberar los transmisores en el final de esta. Cuando la diferencia de potencial es sumada y está por debajo de este umbral, el axón descansa. [7]

4.2 Tecnología de Electroencefalograma (EEG)

Existen diferentes tipos de neuronas: sensitivas, motoras e inter-neuronas, y hay alrededor de 20 tipos principales de picos que generan actividad eléctrica cerebral. La mayoría de estos picos son patrones periódicos. Este hecho hace que sea razonable descomponer las señales del EEG en un conjunto de frecuencias armónicas, las cuales se describirán más adelante. Mediante la observación de las diferencias entre las señales eléctricas procedentes de los diferentes lugares en el cuero cabelludo, se puede monitorear la actividad eléctrica cerebral y ver qué partes del cerebro son eléctricamente activas durante diferentes tipos de actividades, y qué tan alto es el potencial eléctrico de la actividad.

El EEG lee potenciales post sinápticos, que son relativamente continuos (un potencial persiste hasta 100 ms). Los potenciales de acción son muy breves (1 ms) y su aportación eléctrica es pequeña, por lo que no se puede realizar un seguimiento de estos en el EEG. Por medio de varios electrodos colocados en partes estratégicas del cuero cabelludo, podemos leer las diferencias de potenciales que existen entre ellos. [7]

4.3 Interfaz Cerebro Computadora

Las ICC (Interfaz cerebro computadora o BCI por sus siglas en inglés Brain Computer Interface) se puede definir como los circuitos neuronales eléctricos y computacionales artificiales que compensan, reconstruyen, reparan, e incluso mejoran las funciones cerebrales que van desde el centro sensorial a los dominios de control de motores. [2]

En las últimas dos décadas, se ha producido un rápido progreso en este tipo de interfaces que proporcionan un vínculo claro entre el humano y una máquina externa, dado que en un principio

fueron utilizados como un medio para la comprensión de los mecanismos básicos a través del cual el sistema nervioso controla el movimiento. [8]

Las ICM (Interfaces Cerebro Maquina) son capaces tanto de extender las capacidades humanas, como el control de computadores y de su sustitución, por ejemplo, miembros bióticos, véase figura 4. [3]

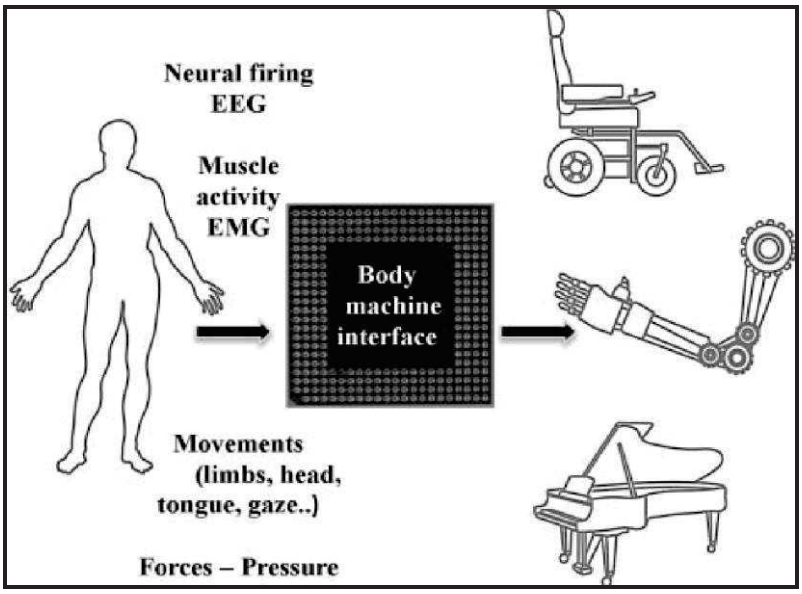


Figura 4 Esquema de una interfaz típica Cerebro-Computadora. [3]

4.4 Homúnculo de Penfield

Entre 1937 y 1954 el neurocirujano estadounidense Wilder Penfield y sus colaboradores desarrollaron diversas representaciones de un aspecto llamativo de la topografía cerebral: la presencia de “mapas” de las vías nerviosas, tanto las sensoriales como las motoras, en la corteza.

Las distintas funciones de nuestro organismo no se encuentran representadas de forma proporcional en dicho mapa, sino que su tamaño depende de la complejidad de los nervios correspondientes.

La representación cortical de los nervios motores y de los receptores cutáneos correspondientes se sitúa en la corteza motora primaria, en el surco central, una región del lóbulo frontal que se encuentra justo al lado de la corteza somestésica.

La corteza motora primaria es el área del cerebro más importante para el funcionamiento del sistema motor: recibe aferencias del tálamo y trabaja conjuntamente con el resto de regiones asociadas al movimiento, como la corteza motora suplementaria, para elaborar y ejecutar esquemas motores.

El aspecto del homúnculo motor consiste en que su boca, sus ojos y sus manos son enormes en comparación con el tronco, los brazos o las piernas, como es mostrado en la figura 5. Esto se debe a la mayor especificidad en la localización de los receptores y nervios motores, mucho menos numerosos que los sensoriales en gran parte del cuerpo. [9]

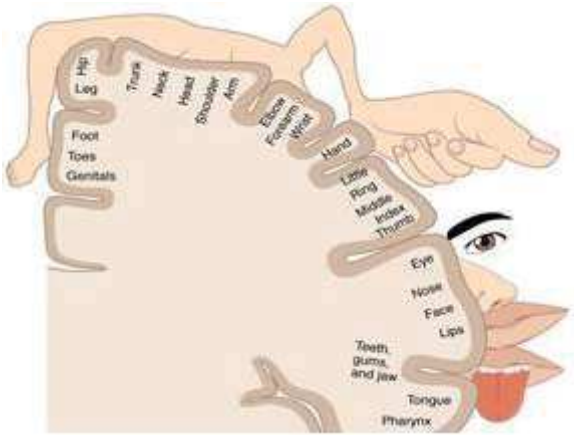


Figura 5 Homúnculo Motor de Penfield. [9]

5. Desarrollo

5.1 Lectura de datos

Se desarrolla un programa en Matlab®, el cual, con la diadema Emotiv Epoc+ colocada en un usuario, lee la actividad eléctrica cerebral en 16 diferentes puntos del cuero cabelludo. Este programa permite realizar un muestreo con el nombre de la acción realizada y las gráficas de cada una de las lecturas de los 16 canales. Estas lecturas constan de 5 diferentes ondas en distintas frecuencias, las cuales varían según la acción o gesto que el usuario realiza.

El script es un programa que le indica al usuario qué gesto realizar en un determinado momento para ser almacenado y analizado para ajustar los parámetros de lectura para el script que funciona como intérprete de acciones. Con este script, es posible leer los datos de todos los canales y almacenarlos en una base de datos específica para el usuario que realiza el entrenamiento y así, guardar los datos recibidos en una base de datos.

Posteriormente, se escribe un programa que permite analizar de forma continua las señales y compararlas con las bases de datos para así determinar qué acción está realizando el usuario.

Este programa además de reconocer la acción ejecutada por el usuario emite una señal serial a una interfaz gráfica, la cual es controlada por el usuario. Este programa además de reconocer la acción ejecutada por el usuario emite una señal serial a una interfaz gráfica, la cual es controlada por el mismo.

5.2 Programación en Matlab®

A lo largo de esta tesis, durante la investigación de las posibles fuentes de desarrollo se encuentra un SDK (Software Development Kit), el cual puede ser descargado en la página de github.com, desarrollado por la comunidad, y utilizado por esta misma por su fácil acceso, no tiene costo y ofrece una herramienta clave para comenzar con el desarrollo de tecnología para los sistemas ICC leyendo las señales cerebrales y separándolas en cinco diferentes tipos de onda para cada canal facilitando el estudio de dichas señales.

El programa que se usa para la obtención de datos, obtenido del SDK, inicialmente cumple solamente con la función de imprimir los valores una lectura hecha previamente, impidiendo valorar los resultados en tiempo real. Con esta información es necesario realizar modificaciones de acuerdo con lo que se necesita, para evaluar el electroencefalograma mientras se realizan los comandos asignados.

Para la seleccionar las acciones a ejecutar se tiene en cuenta el homúnculo de Penfield, el vual indica que una de las partes del cuerpo que más efecto tiene en el cerebro a la hora de realizar el EGG es el rostro, más específicamente el movimiento de sus partes, por ejemplo, ojos, nariz, boca, etc.

5.3 Pruebas en Matlab®

Continuando con lo anterior se procede a realizar pruebas utilizando MATLAB®. Se lleva a cabo una lectura en tiempo real de los canales para detectar los cambios en las ondas con diferentes gestos como guiñar un ojo y apretar la mandíbula. De esta manera se identifica qué ondas son alteradas con las diferentes acciones y se observan cambios notables entre ellos, véase Figura 6 a Figura 15 donde el eje “X” representa las muestras de la prueba en un periodo de 30 segundos y el eje “Y” los voltajes obtenidos en micro-voltios.

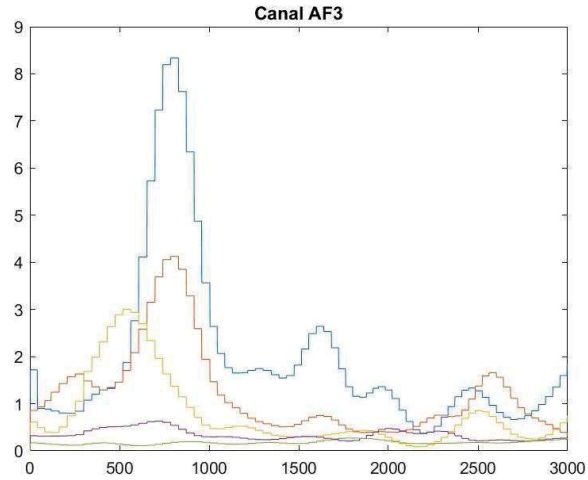


Figura 6 Canal AF3– Estado: Parpadeo.

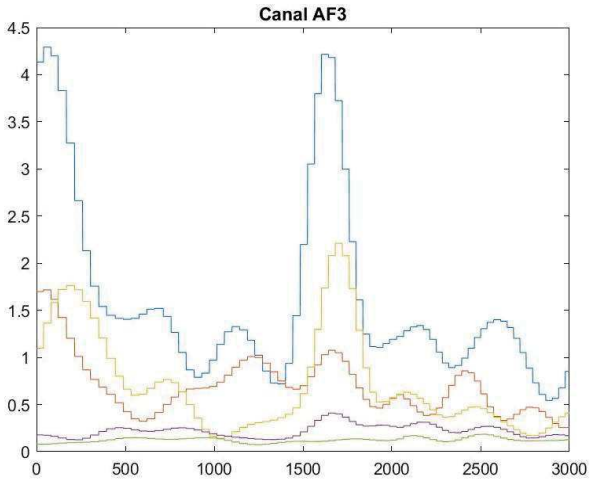


Figura 8 Canal AF3 – Estado: Guiño Derecho pronunciado

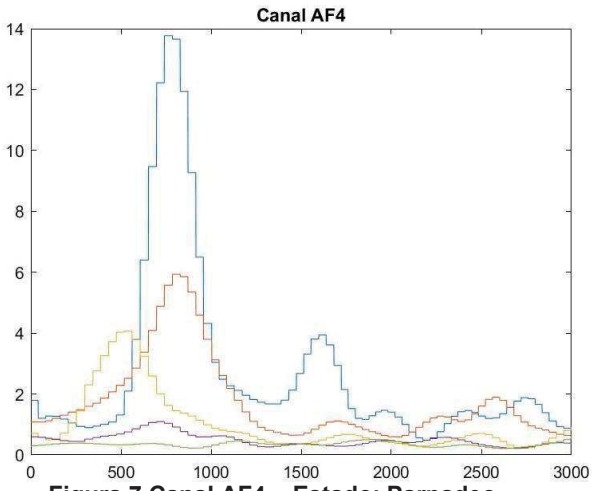


Figura 7 Canal AF4 – Estado: Parpadeo.

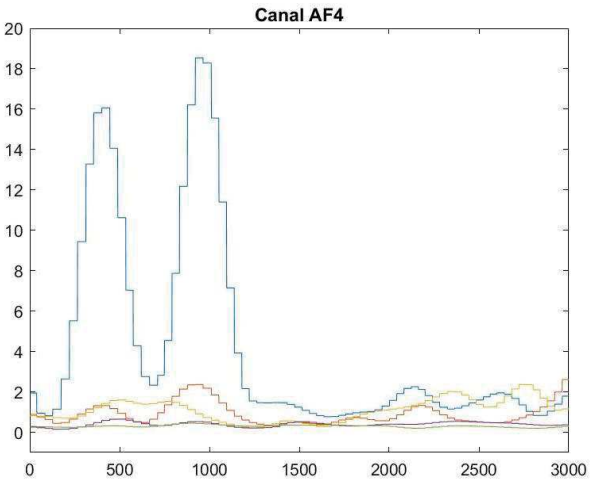


Figura 9 Canal AF4 – Estado: Guiño Derecho pronunciado

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 14, pp.172 - 185, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

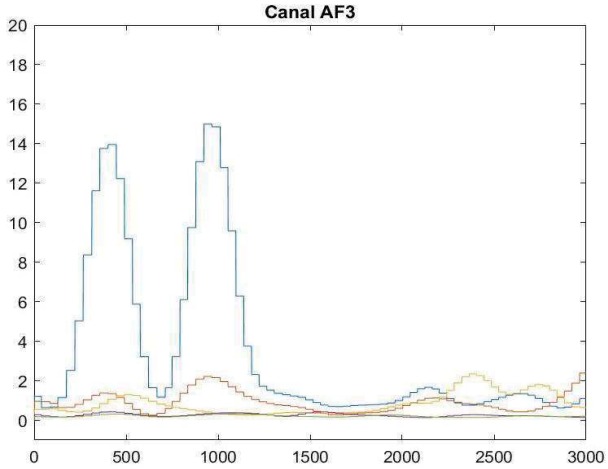


Figura 10 Canal AF3 – Estado: Guiño Izquierdo pronunciado

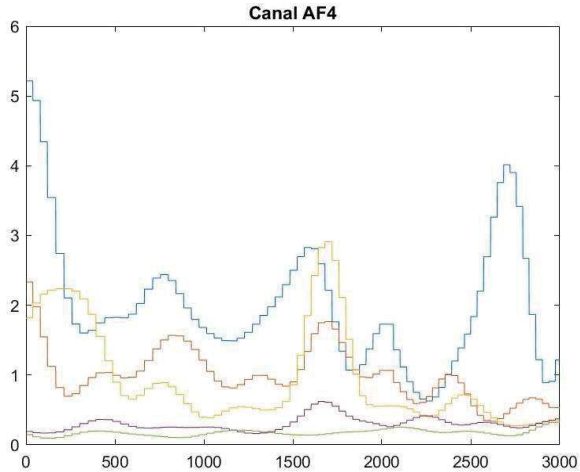


Figura 11 Canal AF4 – Estado: Guiño Izquierdo pronunciado

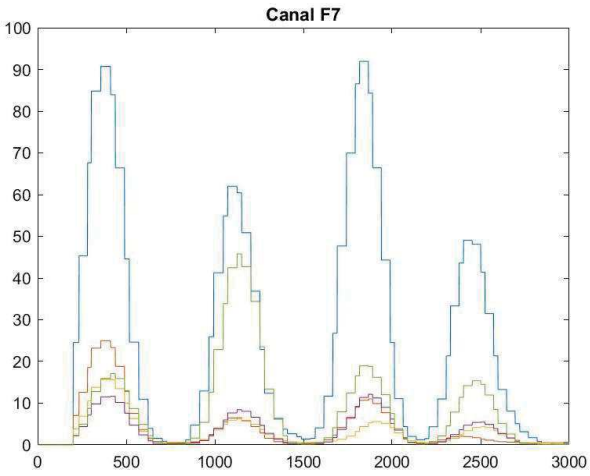


Figura 12 Canal F7 – Estado: Apretar mandíbula

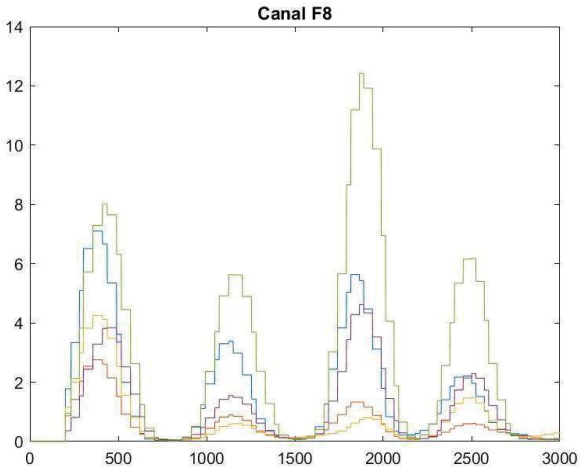


Figura 13 Canal F8 – Estado: Apretar mandíbula

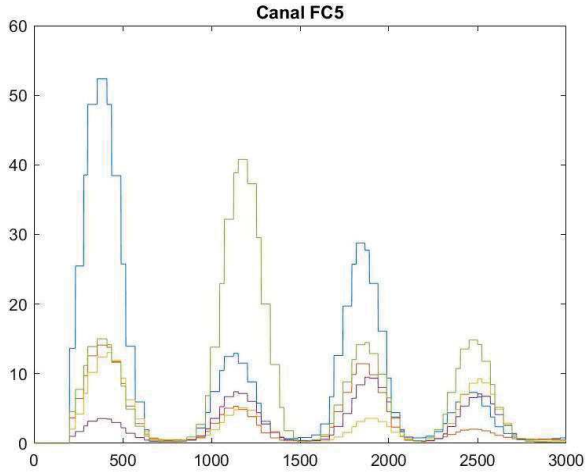


Figura 14 Canal FC5 – Estado: Apretar mandíbula

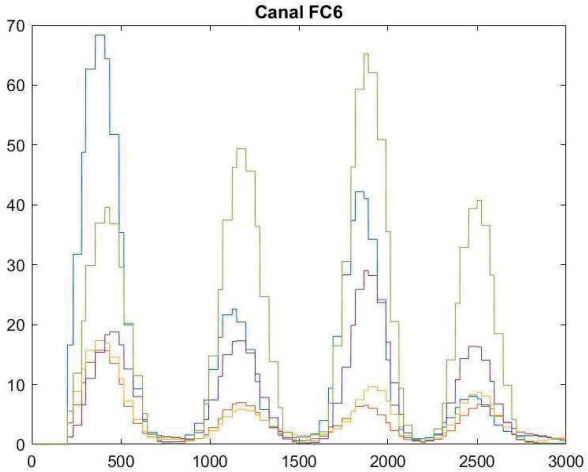


Figura 15 Canal FC6 – Estado: Apretar mandíbula

Tabla 1. Pruebas de acción apretar mandíbula 1.

Apretar Mandibula ·1														
Canales	AF3	AF4	O2	F3	F4	F7	F8	FC5	FC6	P7	P8	Pz	T7	T8
Theta	0.5	15	0.4	18	8	48	2	6	8	1.6	2.5	0.3	9	125
Alpha	0.2	7	0.2	5	2	2	0.4	2	5	1	5	0.2	3	30
High Beta	0.6	7	0.3	2.5	3	3	0.5	3	5	1.8	2.5	0.5	6	5
Low Beta	1.4	28	0.6	21	5	5	1	3	15	4	7	0.7	2	8
Gamma	2.5	15	1	35	13	15	5	14	36	11	15	1.3	11	10

Tabla 2. Pruebas de acción apretar mandíbula 2.

Apretar Mandibula ·2														
Canales	AF3	AF4	O2	F3	F4	F7	F8	FC5	FC6	P7	P8	Pz	T7	T8
Theta	0.3	9	0.3	10	4	12	0.4	2	1	2	2	0.1	5	70
Alpha	0.3	4	0.1	4	1	1	0.2	0.5	1	0.5	1	0.1	2	35
High Beta	0.4	2	0.3	6	1	3	0.4	1	7	2	5	0.2	1	10
Low Beta	0.5	4	0.3	10	3	5	1	4	8	1	8	0.5	4	5
Gamma	3	20	0.8	40	8	10	2	16	10	5	10	0.8	9	10

Al analizar los resultados entregados por MATLAB® e identificar los canales se procede a realizar la programación en visual para que el sujeto que vaya a utilizar la diadema pueda entender que acción es la que se va a realizar, la aplicación para el manejo del sistema domótico se realiza en Visual Studio® y se conecta con Arduino el cual envía las salidas de los valores recibidos

5.4 Programación en Arduino

Se desarrolla un programa en la interfaz de Arduino que recibe las señales emitidas por la interfaz gráfica creada en Visual Studio, estas señales son recibidas e interpretadas para enviar un pulso y encender un led el cual simula ser un foco

5.5 Programación en Visual Studio

En el programa de Visual Studio se desarrolla una interfaz gráfica que contiene los diferentes controles para el envío de señales digitales con el cual se pretende controlar sistema domótico.

El usuario puede seleccionar cualquiera de las opciones a controlar dentro de la interfaz gráfica utilizando solamente gestos oculares.

6. Equipo Emotiv Epoc+

6.1 Emotiv Epoc+

El equipo Emotiv EPOC+ es un sistema de detección neuro-eléctrica que capta y amplifica ondas cerebrales generadas por diferentes “acciones” mentales. Este dispositivo es capaz de obtener las señales de los 14 canales: AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF4, basándose en el sistema internacional 10-20, el cual es un método aprobado para describir la ubicación de electrodos en el cuero cabelludo, para el registro del EGG.

Este dispositivo también maneja un filtro para frecuencias de 0.2 a 45 Hz, el cual puede tomar hasta 128 muestras por segundo en cada canal (EMOTIV, 2016).

Este dispositivo incluye 16 sensores que están compuestos de una capa de filtro, los cuales tienen como base un contacto chapado en oro como se muestra en la figura 16.

Estos sensores están montados en plástico de manera que es posible realizar su ensamble de manera sencilla.

6.2 Materiales

- Conjunto de diadema con batería de litio recargable ya instalada
- Receptor inalámbrico USB
- Paquete de sensores de hidratación con 16 unidades
- Solución salina
- Cargador de batería de 50/60Hz 100-250 VCA (clientes de EE. UU.) o cargador USB (clientes de fuera de EE. UU.)
- Disco de instalación de CD para Windows XP o Vista (para diadema EPOC para el consumidor. Los SDK son entregados electrónicamente)

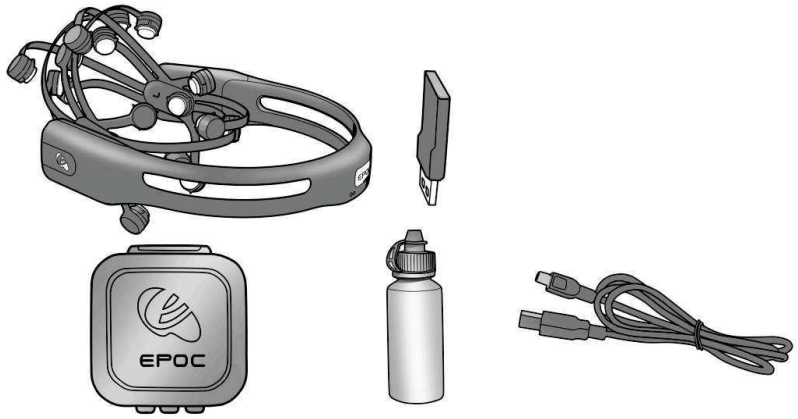


Figura 16 Material del paquete Emotiv Epoc+

6.3 Carga

Asegúrese de que el interruptor pequeño en la parte inferior trasera de la diadema esté en la posición de "Apagado" antes de comenzar, como se observa en la figura 17.

Enchufe el cable mini USB a la diadema y el otro extremo USB al eliminador conectado a una toma de corriente eléctrica de 50 a 60 Hz de 100 a 250 V para así suministrar energía al dispositivo,

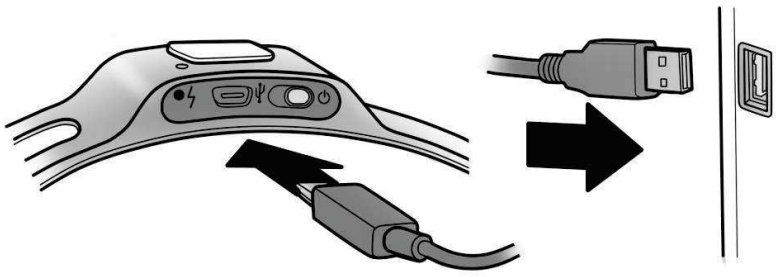


Figura 17 conexión para cargar la diadema Emotiv Epoc+

La batería de litio se puede recargar al 100% de su capacidad en aproximadamente 4 horas, dependiendo del estado inicial de carga.

La carga durante 30 minutos generalmente produce un aumento de alrededor del 10% en la carga.

La diadema Epoc+ contiene dos LED de estado ubicados en la parte posterior y al lado del interruptor de encendido. Cuando el interruptor de alimentación está en la posición "ON", el LED trasero se ilumina de color azul si hay carga suficiente para el funcionamiento correcto, a menos que la carga esté en progreso. El LED de carga aparecerá naranja durante la carga de la batería; cuando la batería esté completamente cargada, el LED de carga se iluminará en verde.

NOTA: La diadema no debe cargarse mientras esté en la cabeza del usuario.

6.4 Hidratación de sensores

Para establecer una buena conducción entre el sensor y cuero cabelludo, es necesario realizar un proceso de hidratación, este consiste en saturar los sensores con solución salina de manera que el filtro quede completamente empapado de la solución. Para evitar derrames, la solución puede ser aplicada a los sensores por medio de una jeringa, como se observa en la figura 18.

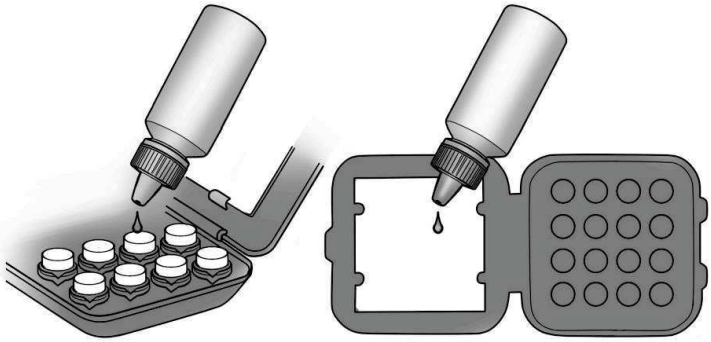


Figura 18 Hidratación de sensores

6.5 Ensamble de sensores

Después del proceso de humedecimiento, retire los sensores con sus almohadillas humedecidas del paquete hidratante e inserte cada uno en los brazos de plástico negro de la diadema, girando cada uno en el sentido de las agujas del reloj un cuarto de vuelta hasta sentir un "clic" definido. El "clic" indica que cada sensor está instalado correctamente en uno de los brazos, ver figura 19.

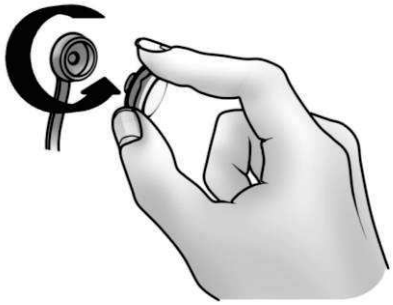


Figura 19 Colocación de los sensores en la diadema

6.6 Emparejamiento

Inserte el adaptador transceptor USB en una de las ranuras USB de su computadora. Colocar el transceptor USB a una distancia considerable del PC y el monitor para mejorar la mala recepción. Luego encienda el auricular con el interruptor en el extremo inferior de la diadema, manteniéndola cerca del transceptor, ver figura 20.

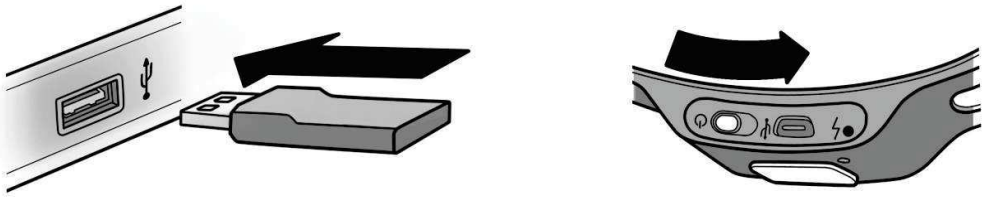


Figura 20 Emparejamiento de la diadema

6.7 Colocación

Usando ambas manos, deslice la diadema desde la parte superior de la cabeza. Coloque los brazos del dispositivo como se muestra, teniendo cuidado de colocar los sensores con el inserto de goma en el hueso justo detrás de cada lóbulo de la oreja. La colocación correcta del sensor de goma es crítica para el correcto funcionamiento, como se observa en la figura 21.

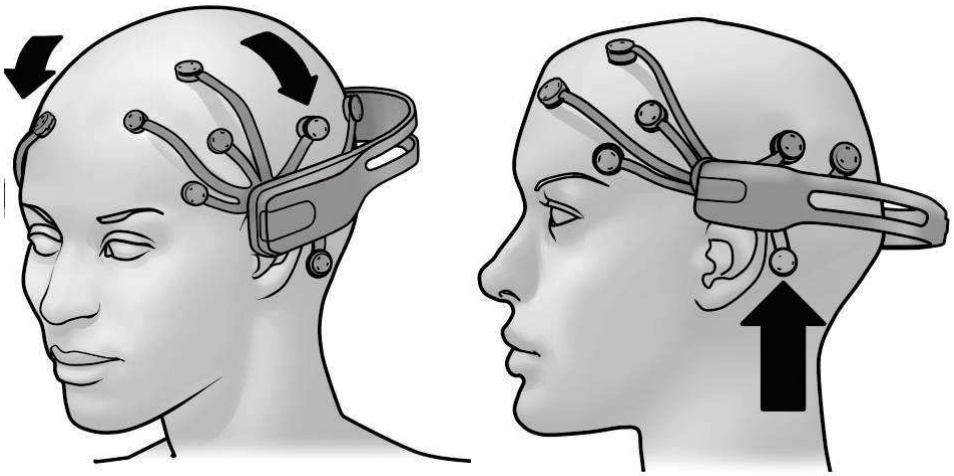


Figura 21 Colocación y orientación de la diadema

Los dos sensores frontales deben estar aproximadamente en la línea del cabello o aproximadamente del ancho de 3 dedos por encima de las cejas, como se observa en la figura 22.

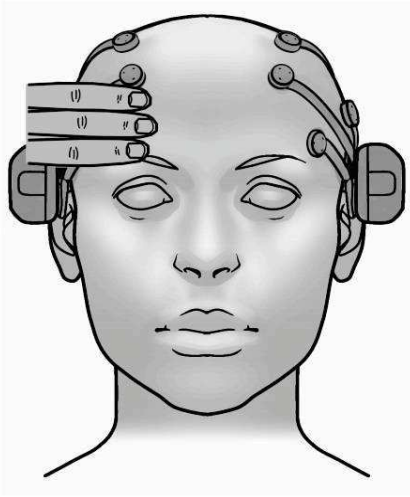


Figura 22 Separación de los electrodos frontales respecto a la ceja

Una vez que la diadema esté en posición, mantenga presionados los dos sensores de referencia (ubicados justo arriba y detrás de las orejas) durante unos 5-10 segundos. Un buen contacto de sensores de referencia es la clave para una buena señal. Las luces correspondientes a estos sensores de referencia pasan de rojo a verde en la pantalla de configuración de los auriculares del panel de control de EPOC.

7. Resultados

Se tiene una aplicación capaz de indicar al usuario la acción que va a realizar en base al movimiento facial ejecutado, siendo un parpadeo la selección de uno de los dispositivos a controlar, un guiño derecho un desplazamiento entre las opciones hacia la derecha y un guiño izquierdo un desplazamiento entre las opciones a la izquierda, mientras que la acción de apretar la mandíbula suspende los comandos de parpadeo y guiño para evitar un comando no deseado mientras el usuario quiera descansar, ya que hay una pequeña posibilidad de que el movimiento ocular durante el sueño pueda accionar alguna de las opciones, permitiendo de esta manera evitar riesgos y las opciones pueden ser habilitadas de igual forma mediante la actividad de apretar la mandíbula. La aplicación se muestra en la figura 23.

Figura 23 Aplicación habilitada

8. Conclusiones

En este artículo se describen a detalle la instalación y recomendaciones para el buen funcionamiento de la diadema emotiv epoc, además se describe una aplicación de domótica. También, se describe los gestos de la cara y la señales que emite, los resultados experimentales son mostrados en el software de Matlab. También, se muestra las señales cerebrales que se obtienen mediante un EEG (Electroencefalograma), dado que varias de sus características y formas de onda se relacionan con procesos cerebrales, éstas pueden ser generadas por el usuario o inducidos con la ayuda de estímulos visuales o sonoros. Se realiza un experimento relacionado con la domótica utilizando Matlab, el cual consiste en realizar un gesto con la cara para manipular dispositivos de casa y se obtuvieron resultados experimentales buenos.

9. Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima, y al PFCE 2019 que me apoyaron para la realización de esta investigación, elaboración y pruebas de este proyecto.

Referencias

[1] Kennedy PR. junio 1998. Restoration of neural output from a paralyzed patient by a direct brain connection. NCBI Recuperado de: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9665587?_ga=2.170177698.34178342.1536335390-1478330381.1534914274

[2] Mitsuo Kawato. 2008. Brain controlled robots, HFSP Journal, 2:3, 136-142.

[3] Maura Casadio, Rajiv Ranganathan & Ferdinando A. Mussa-Ivaldi. 2012. The Body-Machine Interface: A New Perspective on an Old Theme, Journal of Motor Behavior, 44:6, 419-433.

[4] Kröger, Torsten. Wahl, Friedrich. Mayo 2009. Advances in Robotics Research: Theory, Implementation, Application. Springer.

[5] Miyamoto, H, Schaal, S, Gandolfo, F, Gomi, H, Koike, Y, Osu, R, Nakano, E, Wada, Y, and Kawato, M. 1996. “A Kendama learning robot based on dynamic optimization theory.” Neural Networks 9, 1281–1302.

[6] Hornero, R. 2012. Brain-Computer Interface (BCI). Aplicado al entrenamiento cognitivo y control domótico para prevenir los efectos del envejecimiento.

[7] Kuzovkin I. 2013. Adaptive Interactive Learning: A Novel Approach to Training Brain-Computer Interface Systems. Thesis (MCC) University of Tartu Faculty of Mathematics and Computer Science Institute of Computer Science

[8] Litvintsev, A. I. 1968. Search activity of muscles in the presence of an artificial feedback loop enclosing several muscles simultaneously. Automation and Remote Control, 29, 464–472.

[9] Alex Figueroba. s.f. Los homúnculos sensorial y motor de Penfield: ¿qué son?. Psicología y mente. Copyright 2018 Psicología y mente Recuperado de: https://psicologiaymente.com/neurociencias/homunculos-penfield

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 15, pp.186 - 197, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Dispensador Automatizado de Alimento para Aves

Ávila Velandia Daniel Eduardo, Curtidor Zabala Johan Sebastián y Torres Núñez Camilo

Universidad Católica de Colombia
deavila@ucatolica.edu.co

Resumen

El documento presenta el diseño e implementación de un dispensador automatizado de alimento para aves de corral, conformado por una estructura física, mecánica y electrónica, que incorpora un circuito de temporización que se activa en ciertos intervalos de tiempo durante el día, permitiendo al sistema mecánico dosificar la cantidad de alimento a las aves de corral y al mismo tiempo encender la etapa de audio para llamar la atención de las aves a la hora de alimentación. Todo el proceso es regulado por un microcontrolador, que ejecuta órdenes de entradas en las salidas, basadas en la decodificación de tareas específicas para lograr el proceso automático de dosificación de alimento en un intervalo de tiempo.

Palabras clave: Automático, Control, Dispensador, Sistema, Temporizador, Tolva

1. Introducción

El consumo de productos avícolas, especialmente los alimentos de aves de corral, ha experimentado un constante crecimiento en los últimos años, una tendencia que se prevé continuará. Gran parte del incremento de la demanda mundial de productos de aves de corral corresponde a los países en desarrollo. Este crecimiento de la industria avícola está ejerciendo un profundo efecto en la demanda de alimentos animales y materias primas.

Los distintos procesos técnicos y productos en el área de ingeniería electrónica y de telecomunicaciones están mostrando una creciente integración de la mecánica con la electrónica digital y procesamiento de la información en el campo de la agricultura. Generando que varias empresas del país estén comenzando a desarrollar automatización y mejoramiento de sus procesos, a todos los niveles. Se hace necesario desarrollar máquinas y dispositivos que mejoren los procesos industriales y generen productos más homogéneos, en un menor tiempo y a un costo más bajo; sin embargo la agricultura en Colombia y en especial en la región en cuestión de alimentación de animales es muy inestable por las prácticas de alimentación manuales , sin un control estable de la cantidad que se dispensa, teniendo por consecuencia la adquisición de tecnologías europeas incrementado los costos de manutención para los criadores de las aves de corral. Por lo tanto se necesitan sistemas que sean autónomos y tengan control de sus procesos diarios, como lo son la alimentación de animales domésticos.

Los usuarios encargados de las aves en el campo, generalmente no han tecnificado el proceso de alimentación de las aves de corral, llenan los comederos de forma manual, a esto se suma el tiempo empleado en mezclar los diferentes tipos de alimentos para que los animales tengan una buena alimentación, en algunos casos suelen dejar varias horas a estas aves solas sin poder alimentarlas, afectando su producción y su crecimiento.

Por ello se genera la necesidad de crear un sistema temporizado que almacene el alimento en una tolva por raciones, para luego dosificarlo automáticamente en tiempos programados sin tener que ser manipulada por el usuario durante el día.

Es de vital importancia que los principales centros de producción en el país de aves de corral desarrollen sistemas tecnológicos que ayuden a administrar y controlar la dosificación y tiempo en que se alimenta a las aves de corral, actualmente es innovador y asequible desarrollar una máquina que controle el alimento debido a la desolación de las aves en tiempos importantes durante el día , viéndose afectado su desarrollo, crecimiento y producción, actualmente varias fincas presentan desolación de aves, todo porque los habitantes realizan actividades del campo especialmente de cultivos en zonas muy distantes de las aves, por lo tanto la solución es desarrollar e implementar un sistema electrónico, capaz de soportar y ayudar a las personas e usuarios en fincas, para poder alimentar las aves de corral en tiempos adecuados de forma precisa y eficiente.

2. Marco Teórico

En el mercado existen varios tipos de máquinas que dosifican el alimento para las aves de corral, de las cuales destacan

2.1 Comederos automáticos de cadena

Deben permitir un espacio mínimo de 2,5 cm (1 in.) por ave, cuando determine el espacio de comedero los dos lados de la cadena deben ser incluidos. El borde de La banda de alimento debe estar al nivel del lomo de las aves. La mantención de la banda de alimento, esquinas y tensión de la cadena es esencial. La profundidad del alimento se controla por medio de tapas corredizas en las tolvas y debe ser monitoreada constantemente para evitar desperdicio de alimento. Estos tipos de máquinas están destinados a la industria, ocupan gran espacio y son costosos, lo que se espera con la máquina es lograr obtener un equipo de estos, a un precio accesible, que no ocupe espacio y de fácil mantenimiento. En la figura 1 se muestra el diseño del comedor automático [1].

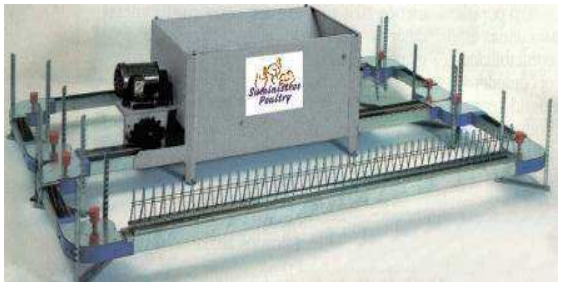


Figura 1. Comedor automático de cadena para aves.

2.2 Dosificadores

El dosificador es una herramienta primordial para una empresa o proceso productivo, sus funciones primordiales consisten en llenar o proveer de producto en una cantidad determinada, durante un ciclo de tiempo. El principio de una dosificación es controlar la concentración de los productos agregados y asegurar la mezcla homogénea en un producto final.

Los dosificadores son dispositivos utilizados para regular el despacho del producto en las diferentes etapas de un proceso, están compuestos por servomotores, motores eléctricos, electroimanes, cilindros neumáticos y reguladores.

Los dosificadores en general están constituidos de 3 partes como se ilustra en la figura 2. Tolva de almacenamiento, sistema dosificador, boquilla o tubo de descarga

Estas partes, pueden variar en diseño, de acuerdo al producto a dosificar, la forma como se determina la cantidad a descargar; ya sea por peso o por volumen y la cantidad de material a dosificar.

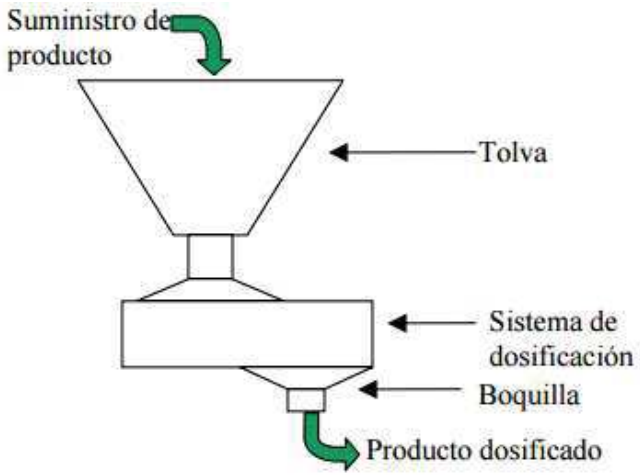


Figura 2. Partes de un dosificador.

La tolva recibe el producto de la línea de producción ya sea por una banda transportadora, por un tornillo transportador o descargándolo manualmente. La función principal de la tolva es mantener producto en su interior para ser dosificado.

El sistema de dosificación es la parte más importante del dosificador en conjunto. Este se encarga de determinar y medir la cantidad de producto que se va a retirar de la tolva, para pasar al siguiente proceso que es el empaque. La medición se puede realizar de dos formas: por volumen o por peso, según las características del producto y el grado de exactitud que se requiera.

Las boquillas o tubos de descarga son los encargados de impedir que el producto que sale dosificado no se riegue o desperdicie, y se direccione correctamente a la bolsa o empaque. También evita riesgos al operario, que tenga un contacto directo con otras partes de la máquina y en productos altamente volátiles que el operario inhale el producto [2].

2.3 Dosificadores de productos

Los dosificadores volumétricos presentados en la figura 3 son utilizados principalmente para dosificar productos homogéneos en sus características físicas, forma, tamaño y peso, como líquidos viscosos, polvos, algunos cereales y granos. En la dosificación volumétrica, la expulsión del material se produce exclusivamente en función del volumen, y con ello, de las cantidades. Como los dosificadores que trabajan de manera volumétrica no miden la masa, sus órganos de dosificación se tendrán que calibrar en función del material antes de cada uso: es preciso determinar qué cantidad de masa tiene que dosificar el órgano en un periodo de tiempo definido. Lo mismo se aplica también cuando se cambia el material y el lote. Además, los sistemas de dosificación volumétricos no pueden compensar automáticamente los cambios en las propiedades del material, como oscilaciones en la densidad aparente. Con el fin de compensar las posibles oscilaciones en el peso de vertido, a menudo los sistemas volumétricos se operan con una sobredosificación. Lo más importante es, no obstante, que los “elementos de volumen” del órgano dosificador estén siempre rellenados de manera uniforme [3].

Figura 3. Dosificador volumétrico.

2.4 Sensores

En la figura 4, se ilustra la configuración básica de los sensores ultrasonidos convencionales que permite medir ondas sonoras de alta frecuencia (>20 KHz) que se propaga hasta que choca con el líquido, se refleja y alcanza el receptor situado en el mismo punto que el emisor. El tiempo entre emisión y recepción es inversamente proporcional al nivel; La velocidad depende del medio de propagación y varía con la temperatura [4].

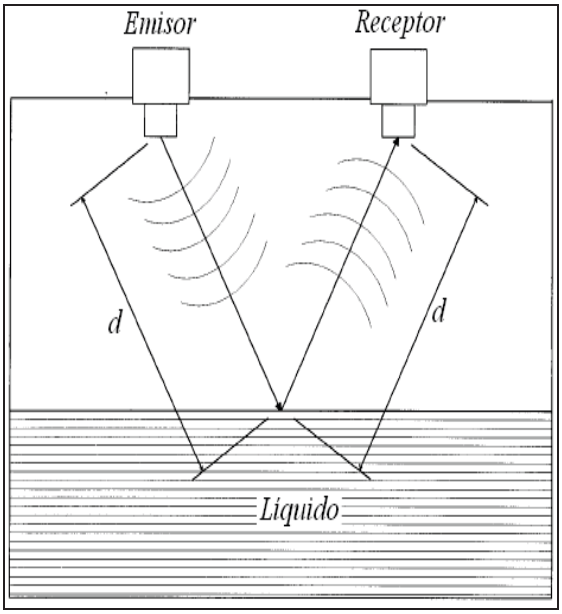


Figura 4. Funcionamiento básico del sensor ultrasonido.

2.5 Temporizador

El DS1307 que se presenta en la figura 5 es un dispositivo que se conoce como “Reloj de Tiempo Real” (Real Time Clock – RTC) que opera a través del bus I2C y que, genera la hora con minutos y segundos, posee un calendario que contempla los años bisiestos hasta fin de siglo, es decir, hasta el año 2100. [5]

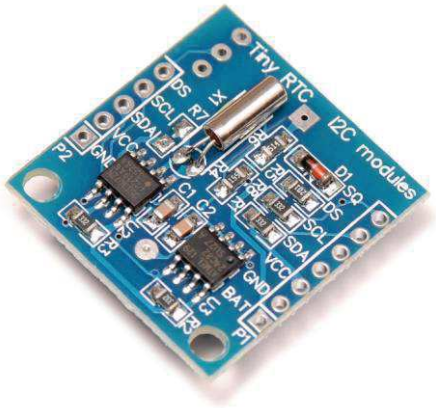


Figura 5. Módulo DS1307

2.6 Grabador de Voz (ISD1820)

El módulo de la figura 6 utiliza el ISD1820 como base principal, es un circuito integradp capaz de guardar múltiples archivos de audio y reproducirlos. El archivo guardado se almacena en una memoria no volátil, para el almacenamiento de mensajes sin consumo de energía. Con el empleo de la memoria Flash embebida, se logra una capacidad de reproducción de 8 a 20 segundos. La tasa de muestreo es de 3.2k con un total de 20s en el registro. Este módulo es fácil de emplear y se puede controlar directamente por pulsadores o tarjetas inteligentes como arduino y microcontroladores [6].

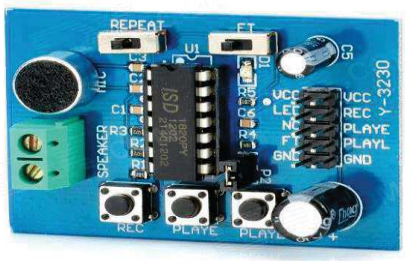


Figura 6. Módulo grabador de voz ISD1820

3. Resultados

Como resultado final se diseña y desarrolla un dispensador de alimentos temporizado para aves conformado por una parte mecánica y electrónica.

3.1 Parte Mecánica

Durante el proceso de desarrollo del proyecto, se investigó y recolecto diferentes métodos de dosificación; al final de este proceso, se analiza el dispensador que cumpla con los requerimientos ideales de operación para el usuario y genere menores gastos de adquisición, funcionamiento y mantenimiento.

En la figura 7, se presenta el diseño físico y estructural del dispensador mediante un modelo que visualiza cada una de las vistas geométricas que constituye el mecanismo.

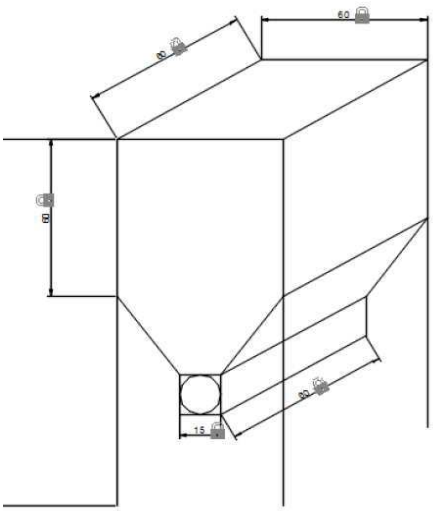


Figura 7. Diseño de la estructura

En la elección del material se utilizó el acero laminado galvanizado ASTM A653 calibre Nº20, ángulo de ¾ de pulgada, para la construcción de cada una de las piezas de la máquina con el mecanismo de aspas y los soportes de la estructura. El material fue seleccionado por ser muy resistente a la corrosión gracias a la cantidad de zinc que posee.

Los ángulos de la tolva, deben ser ideales que no permitan acumular alimento a dicha salida y dentro de la tolva el producto debe tener un flujo constante que facilite la evacuación de los alimentos. La figura 8 representa el despliegue de la tolva.

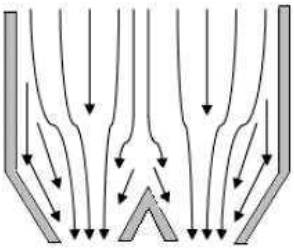


Figura 8. Flujo de alimentos en la tolva

En la figura 9 se observa las dimensiones y las medidas adecuadas que soportan el diseño de la estructura diseñada en solidworks y garantiza la dosificación del producto, están relacionadas con la tolva de almacenamiento y sistema mecánico de dosificación.

Los valores correspondientes de las medidas en la tolva de almacenamiento están dados por el ancho 30 cm, largo 40cm y alto 30cm.

La ecuación 1, permite hallar el volumen total de la tolva (V_t).

$$V_t = Ancho \times L\arg o \times Altura \quad (1)$$

$$V_t = 30cm \times 40cm \times 30cm$$

$$V_t = 36000cm^3$$

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 15, pp.186 - 197, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Dando un volumen de 36000cm^3 que es la cantidad máxima de alimento que puede almacenar la tolva.

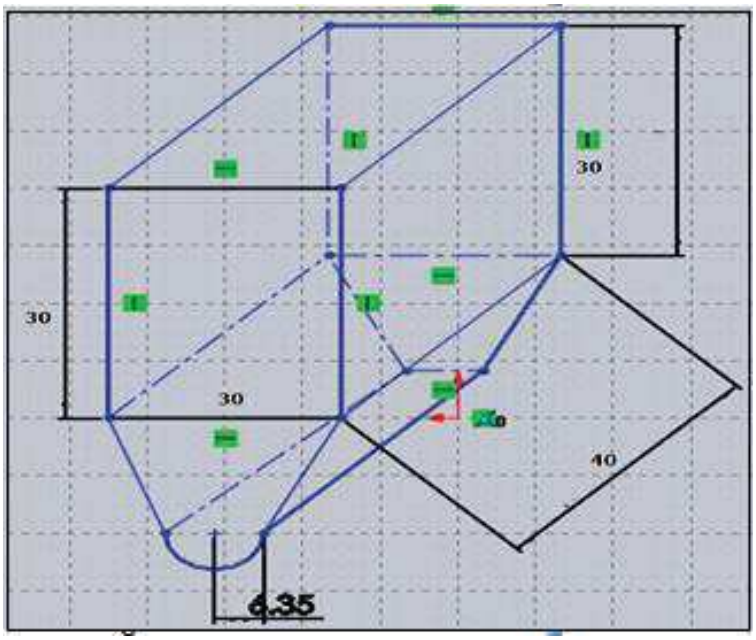


Figura 9. Diseño previsto de la estructura en solidworks

En el sistema de dosificación, se diseñó un cilindro que posee ocho aspas y están acopladas a la estructura mecánica, el cual dispensa la cantidad de producto según la programación de tiempo en el panel de control. Las medidas del sistema mecánico de dosificación se ilustran en la figura 10 relacionado con el diámetro 12,13cm y largo 40cm.

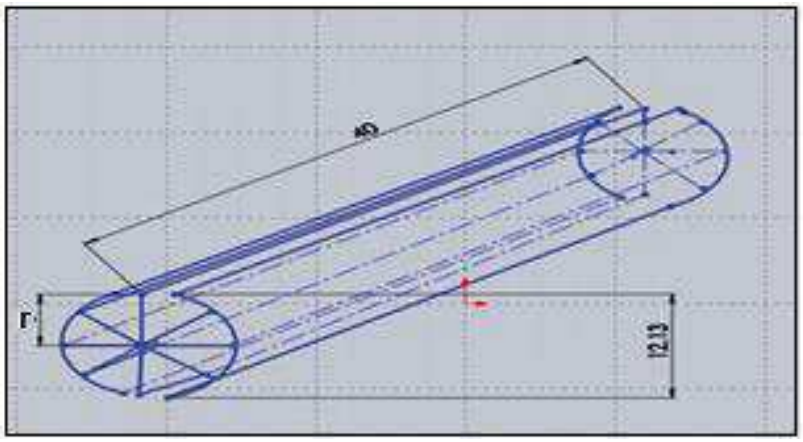


Figura 10. Sistema mecánico de dosificación

El modelo final fue simulado en el programa Solidworks, que representa las características del sistema. En la figura 11 se visualiza la estructura final

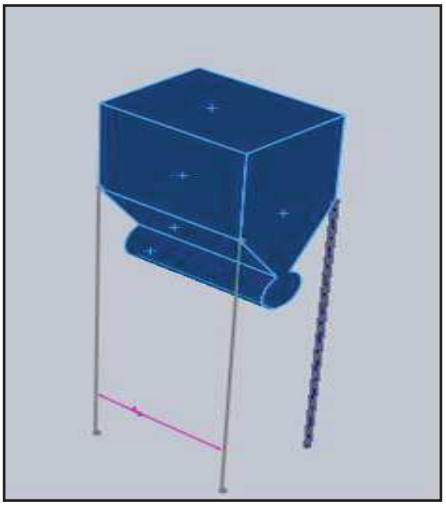


Figura 11. Estructura final

En la figura 12 se representa el desarrollo real de la estructura física, incorporando eje para el acoplamiento de motorreductor de acuerdo a los parámetros, dimensiones y características técnicas que requiere el dispensador.

Figura 12. Modelo final implementado

3.2 Parte Electrónica

El diseño del control se observa en la figura 13, mediante un diagrama de bloques que determina las etapas de entrada y salida en un sistema de lazo abierto, conformado por un microcontrolador encargado de regular el tiempo de dosificación, sensor ultrasonido para determinar la cantidad de alimento en la tolva, generador de audio para el llamado de aves, accionamiento motor y ejecución de las tareas específicas, según la programación del usuario.

Para la selección del circuito que proporciona la hora en tiempo real, se implementa un sistema electrónico preciso y eficaz para adquirir el dato que permite la activación del temporizador en el proceso de dosificación del producto, el funcionamiento interno del sistema consta del reloj que visualiza información de segundos, minutos, horas. El reloj funciona en formato de 24 horas. El DS1307 tiene incorporado un circuito de sensor de tensión que detecta fallas de energía y cambia automáticamente al suministro de batería de respaldo.

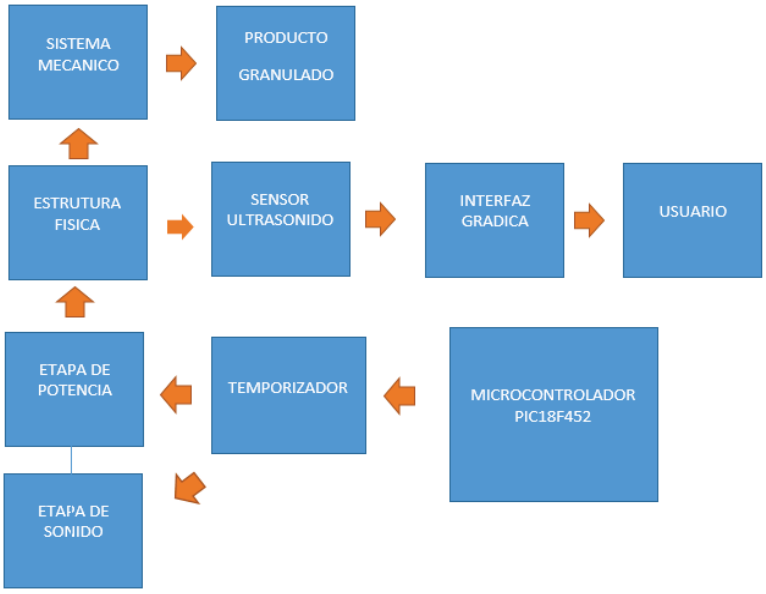


Figura 13. Diagrama de bloques dispensador de alimento para aves.

En la elección de la etapa de potencia y controlador del motor reductor de 12 V DC, se analiza el consumo de corriente del mecanismo. Cuando el motor acciona el sistema mecánico de las aspas con la tolva llena de producto, consume un promedio de 500mW, contexto a ello el sistema más práctico a utilizar es el módulo l298 que soporta 4 A de corriente máxima.

Para el funcionamiento de la etapa de audio, se utilizó el módulo ISD1820, que permite grabar un sonido y reproducirlo en un tiempo de 20 segundos, para llamar la atención de las aves.

El sistema tiene un panel de control para configurar los requerimientos funcionales del dispensador, relacionados con el ajuste de la hora actual, el tiempo de suministro del producto y el tiempo de activación. Inicialmente se realiza la simulación y posteriormente el ensamble. El circuito recibe la señal de datos que el usuario ingrese, en este caso será el tiempo que enciende y/o apaga el motor de la estructura, junto al grabador de voz., todo el proceso de programación se visualiza por medio de un mensaje de orientación proporcionado en la pantalla LCD, como se observa en a figura 14.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 15, pp.186 - 197, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

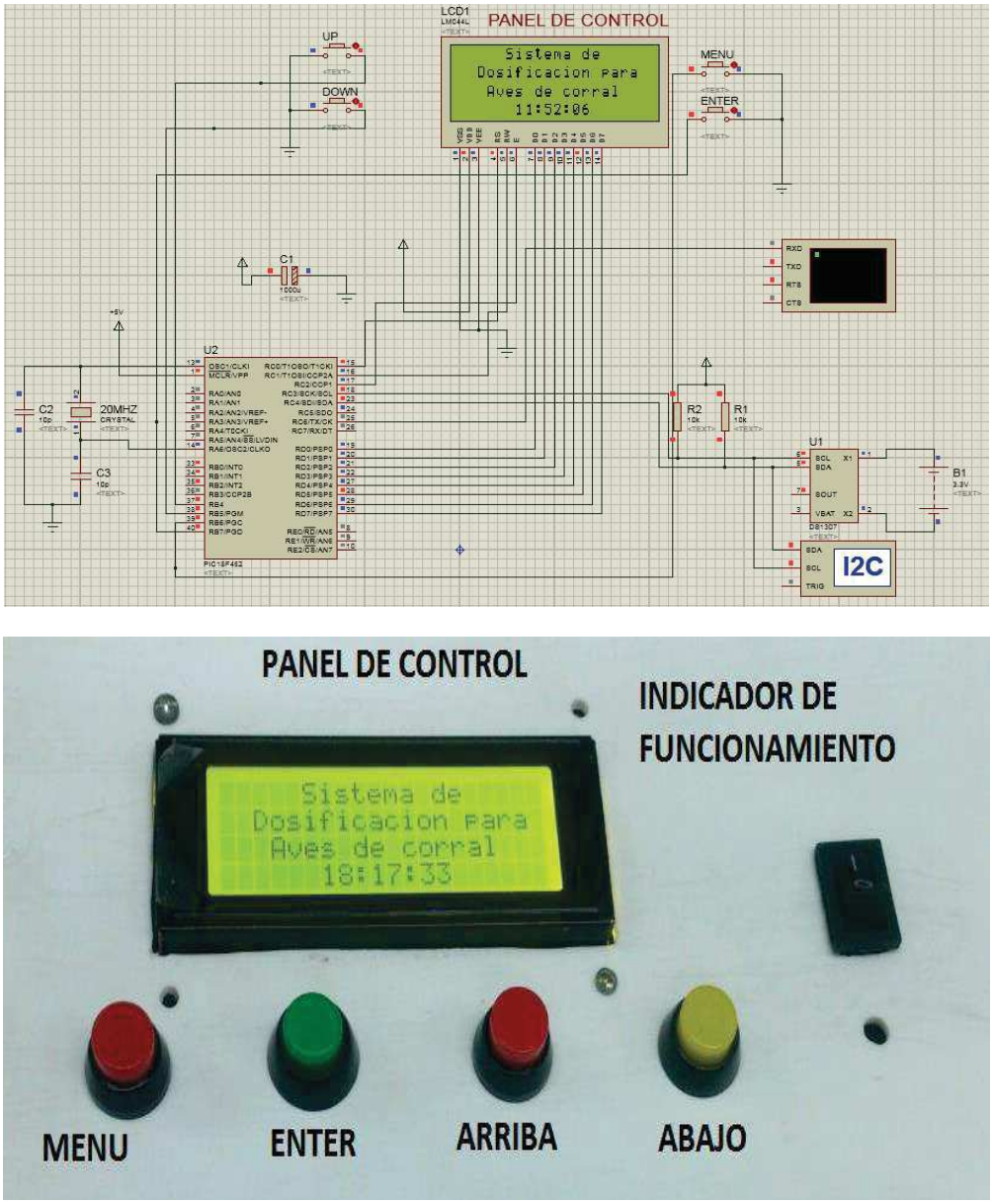


Figura 14. Simulación y desarrollo panel de control.

El dispensador incorpora un sistema mecánico conformado por ocho aspas acoplado a un motorreductor, encargado de dosificar y distribuir el producto continuamente, la tolva cumple la función de almacenar el producto granulado, la bocina genera sonido de ave, para que ellas se acerquen al punto de dosificación, el panel de control es manipulado por el usuario para programar los tiempos de suministro. Finalmente en la figura 15 se observa las fases de diseño, implementación y desarrollo del dispensador de alimento para aves, según los mecanismos y circuitos electrónicos generados en el software solidworks y proteus.

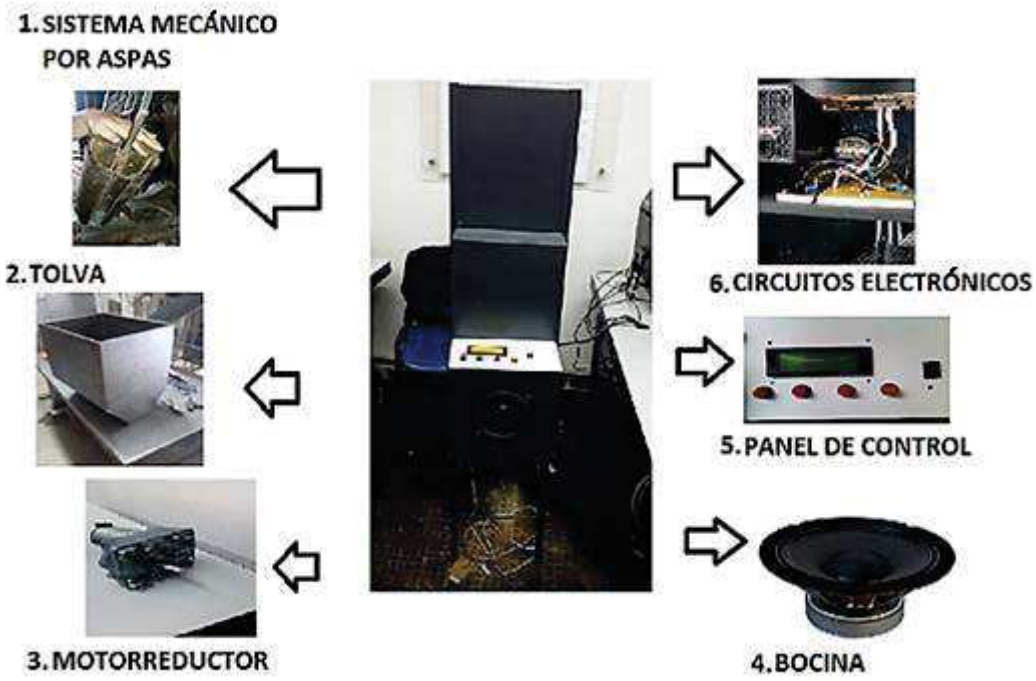


Figura 15. Dispensador de alimento para aves

4. Conclusiones

Se desarrolló un sistema programable para la dosificación de alimento de aves que integra el diseño e implementación de un módulo mecánico, electrónico y de control.

La recopilación de información relacionada con el sistema de dispensado en producto granular, permite construir un dispositivo caracterizado por su diseño, que con sus ocho aspas que dispensa el producto mantiene constantemente su movimiento de giro, evitando la acumulación de producto.

Analizando los distintos modelos de las estructuras mecánicas, que utilizan los mercados del país, se encuentran varios tipos de tolvas circulares, triangulares, cuadradas, se elige el modelo de la tolva rectangular debido a su óptimo ensamble, aseguramiento en la estructura física y proceso de mantenimiento.

La selección del método de dosificación por volumen y no por peso, simplificó los parámetros de la máquina dosificadora sin introducir grandes errores en el peso total del producto.

La construcción y diseño de las aspas se basó en mecanismos de dispensación utilizado en grandes molinos donde se les conoce como válvulas de cuadrante o comúnmente llamadas estrusas, este sistema no permite que se forcé, ni se trabe el sistema.

El dispositivo se caracteriza por ser eficiente y práctico para que el usuario final pueda de manera sencilla programar y digitar las condiciones requeridas en el panel de control para la dosificación del alimento.

La determinación de los componentes electrónicos, se basaron en economía y funcionamiento, de modo que cada etapa que integra el dispensador se elige por los requerimientos eléctricos y características técnicas de la estructura.

El desarrollo del dispensador automatizado es de gran utilidad en el campo agrícola para la regulación del tiempo de alimentación de las aves, caracterizado por su aplicación, funcionalidad y beneficio a la sociedad. El cual permite simplificar las operaciones manuales que se realizan diariamente, mediante la programación del proceso automático.

Referencias

[1] Jiménez, J. "Comedero Automático de canal para reproductora y pollos de engorde" [en línea]. Sevilla: Departamento de a avicultura Colombia [citado 27 marzo, 2016]. Disponible en Internet: <URL: http://www.suministrospoultry.com/comedero.htm/>

[2] Diseño y construcción del sistema de dosificación. Tipo de dosificadores [en línea]. Ecuador: Universidad politécnica salesiana [citado 28 marzo, 2016]. Disponible en Internet: <URL: file:///C:/Users/lab03/Downloads/04%20Diseno%20construccion%20dosificadores_unlocked.pdf>.

[3] Tecnología del Plástico. Dosificadores volumétricos y gravimétricos [en línea]. Colombia: Dosificadores volumétricos y gravimétricos [citado 28 marzo, 2016]. Disponible en Internet: <URL: http://www.plastico.com/temas/En-que-se-diferencian-los-sistemas-de-dosificacion-volumetricos-de-los-gravimetricos+97156 >

[4] Baquero Rozo, G. Instrumentación Industrial: Medición de Nivel [en línea]. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia [citado 30 marzo, 2016]. Disponible en Internet: <URL: http://es.scribd.com/doc/ 272108075/3-Sensores-de-Nivel#scribd>

[5] Neoteo, M. Reloj en tiempo real [en línea]. La empresa [citado 1 abril, 2016]. Disponible en Internet: <URL: http://www.neoteo.com/ds1307-reloj-en-tiempo-real-con-18f2550>

[6] Sigma electrónica. Grabador de voz [en línea]. La empresa [citado 1 abril, 2016]. Disponible en Internet: <URL: http://www.sigmaelectronica.net/isd1820-p-2316.html>

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 16, pp.198 - 211, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Diseño de una Tarjeta de Sensado Basada en un Transductor de Corriente AC.

Olvera Balderas José Armando, Sosa Savedra Julio César y Trejo Estrella Martín Aaron

Instituto Politécnico Nacional, CICATA - Unidad Qro.
Cerro Blanco 141, Colinas del Cimatario, 76090 Santiago de Querétaro
armando.ob@hotmail.com

Resumen

El presente trabajo describe el uso de un transductor de corriente que pueden ser utilizado para instrumentar en donde se requiera una excelente precisión para medir corrientes de hasta 25 A_{rms}, típico en aplicaciones de dominio industrial. El transductor entrega una corriente máxima de 25 mA_{rms} a su valor máximo de medición, es decir, 1 mA_{rms}/A_{rms}. Esta señal es acondicionada mediante el uso de amplificadores operacionales, donde se obtienen niveles de voltaje de 0 a 3 V_{pp} con un offset de 1.5 V_{DC}, para poder ser utilizados en un conversor análogo-digital. El propósito fue obtener una tarjeta de sensado que entregue dichos niveles de voltaje y este pueda ser utilizado en el dispositivo de adquisición que se prefiera. El transductor presenta la desventaja de que requieren una alimentación dual de ±12 V por lo que no es posible alimentarlo con el mismo voltaje de un dispositivo de adquisición de datos que trabaje a 5 o 3.3 V. Por otro lado, las mediciones, presentan un error relativo cercano al 10% con una buena linealidad en corrientes pequeñas y grandes.

Palabras clave: Sensor, transductor, corriente, acondicionador de señal.

1. Introducción

La medida de alguna variable o magnitud física, con la precisión y fiabilidad adecuada, ha sido una parte importante en muchas de las tecnologías de hoy en día; como los dispositivos de uso cotidiano como los celulares, que ya integran múltiples sensores de alguna variable o magnitud física. Para lograr esto, se ha requerido utilizar dispositivos que permitan interpretar esta magnitud física en señales eléctricas.

En general, se ha denominado transductor a todo dispositivo que convierte una señal de una forma física en una señal correspondiente con una forma física distinta [1]. De acuerdo con esta definición, es posible afirmar que un transductor forma parte de un sensor, pero la diferencia entre un sensor y un transductor radica en que el transductor simplemente cambia el dominio de la variable, mientras que el sensor proporciona una salida útil para ser usada como variable de entrada en un sistema electrónico [2]. Para llevar a cabo su función un transductor se vale de algún principio físico de transformación de energía, al que se denomina principio de transducción, como los que se muestran en el esquema de la Figura 1.

Figura 1. Principios de transducción.

Las magnitudes físicas o variables que pueden ser transformadas en señales eléctricas para el uso en un dispositivo, como lo es un microcontrolador, DSP, FPGA, etc., son muy numerosas, lo que da lugar a que las tecnologías o principios de transducción también sean muy variados [3]. Por tanto, un transductor se puede definir como un dispositivo que convierte un tipo de energía en otra.

Un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible que es función de la variable medida [1]. La función de un sensor es obtener señales eléctricas en respuesta de magnitudes de entrada no eléctricas [4].

De este modo, el sensor solo puede ser un dispositivo de entrada, ya que este siempre será un intermediario entre la variable física y el sistema de medida. La importancia del uso de sensores en la ingeniería se hizo presente desde la creación y el desarrollo de máquinas automatizadas. El uso de sensores es fundamental para el desarrollo de sistemas en la actualidad, ya que todo sistema requiere una interfaz con el mundo real que puede requerir medir una variable física [2]. Los sensores de la actualidad entregan señales eléctricas a la salida, de tipo analógico o digital.

El presente trabajo, tiene como objetivo final desarrollar un sensor de corriente a partir de un transductor de aplicación industrial que tiene una excelente precisión, tratando de no perderla a lo largo del acondicionamiento de señal y conservando un error cercano al que menciona el fabricante del sensor.

2. Sensor de corriente

Un sensor de corriente es un transductor entre la variación de corriente eléctrica y un cambio de voltaje proporcional. Este tipo de sensores es muy útil cuando se trata de implementar un sistema de control, se desea conocer la potencia consumida por una serie de circuitos que en conjunto están alimentados por una sola fuente de energía, se necesita detectar el sobreconsumo de corriente, etcétera. En este tipo de sensores existen múltiples vertientes, como se aprecia en la Figura 2, sensores de corriente cuyo principio de operación está basado en el efecto Hall, en la ley de Ohm, o sensores basados en transformadores y otro tipo de efectos, por ejemplo ópticos [5].

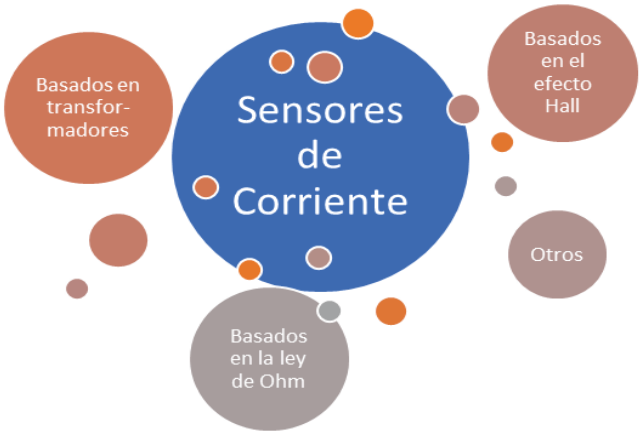


Figura 2. Clasificación de los sensores de corriente.

En general, los dos primeros tipos de sensores de corriente están enfocados a aplicaciones donde la corriente es relativamente baja (hasta unas decenas de amperes), mientras que en los otros casos su uso está enfocado a aplicaciones donde los niveles de corriente manejados son muy altos. Para este caso, en el diseño del sensor, es utilizado un transductor que utiliza el efecto Hall como principio.

2.1 Sensor de corriente basado en el efecto Hall

Los sensores de corriente basados en el efecto Hall son sensores que su principio de funcionamiento se basa en el efecto Hall, el cual consiste en convertir un campo magnético en un voltaje equivalente mediante dicho efecto.

El efecto Hall establece que si una corriente eléctrica (*I*) fluye a través de un conductor en presencia de un campo magnético (*B*) se ejercerá una fuerza transversal que busca equilibrar el efecto de dicho campo, produciendo un voltaje, llamado voltaje Hall, medible en los extremos del conductor [2], [6] (véase Figura 3). Por tanto, un sensor basado en el efecto Hall puede determinar la intensidad de un campo magnético o la corriente a través de un dispositivo si el otro factor se mantiene fijo.

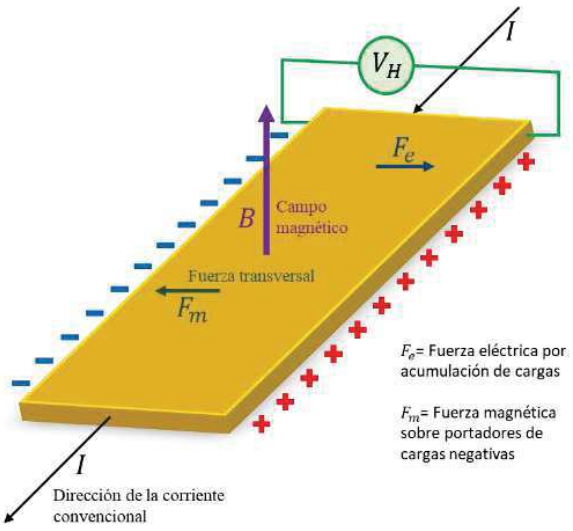


Figura 3. Diagrama del efecto Hall.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 16, pp.198 - 211, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

2.2 Transductor de Corriente LAH 25-NP

El transductor de corriente mostrado en la Figura 4, de la marca LEM, perteneciente a la serie LAH, este ofrece diversos valores de corriente máxima soportada, que depende del modelo denotado por "*LAH 25-NP*", donde 25 indica el valor máximo de corriente soportada [7], [8].

Figura 4. Transductor LAH 25-NP.

El transductor permite realizar mediciones electrónicas de corriente: CD, CA, pulsada, entre otras [7], [8]. Es utilizado en diversas aplicaciones:

- Controladores de servo motores y variadores de velocidad de CA.
- Conversores estáticos para controladores de motores de CD.
- Fuentes de poder ininterrumpidas (UPS).
- Fuentes de alimentación conmutadas (SMPS).

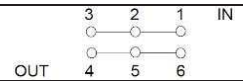
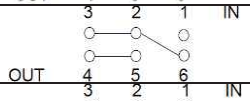
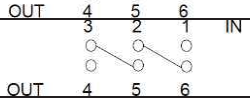
Cuenta con varias configuraciones en los pines de entrada y salida que permiten ajustar el número de vueltas entre el circuito primario y secundario, pudiendo seleccionar entre 1, 2 y 3 vueltas, siendo 1 la configuración típica. Se alimenta con ±12 V y entrega una corriente nominal RMS de 25 mA.

Entre las características importantes del por qué fue seleccionado este sensor se destacan:

- Corriente nominal RMS en la entrada de hasta 25 A.
- Corriente nominal RMS en la salida de 25 mA.
- Voltaje de alimentación ±12 V.
- Precisión de ±0.3%.
- Tiempo de respuesta al 90% de la corriente menor a 500 ns.

De acuerdo a los pines de entrada y salida, se pueden configurar conexiones que permiten cambiar la corriente máxima de entrada y la máxima de salida [7], [8] como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Conexiones recomendadas de acuerdo con la corriente máxima de entrada.

Numero de vueltas primarias	Corriente nominal de entrada (A)	Corriente nominal de salida (mA)	Conexión recomendada
1	25	25	
2	12	24	
3	8	24	

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 16, pp.198 - 211, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Conexión: Otra de las razones por las que se seleccionó el transductor, fue porque requiere de una conexión simple, ver figura, la cual solo depende de la configuración de los pines de entrada y salida, y de una resistencia de medición R_M, además de su voltaje de alimentación a ±12 V [7], [8].

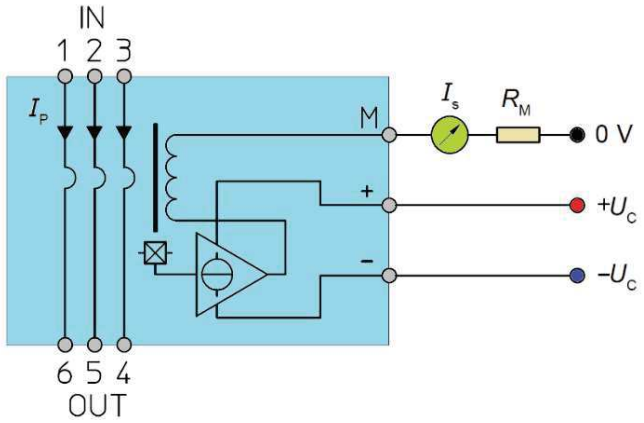


Figura 5. Conexión del transductor LAH 25-NP.

A partir de la resistencia de medición R_M se determinan los cálculos para el circuito de acondicionamiento que se describe en la sección 3.

3. Diseño de la tarjeta de sensado

Se propuso el diagrama a bloques de la Figura 6, donde se muestra cada parte que compone la tarjeta de sensado monofásico.

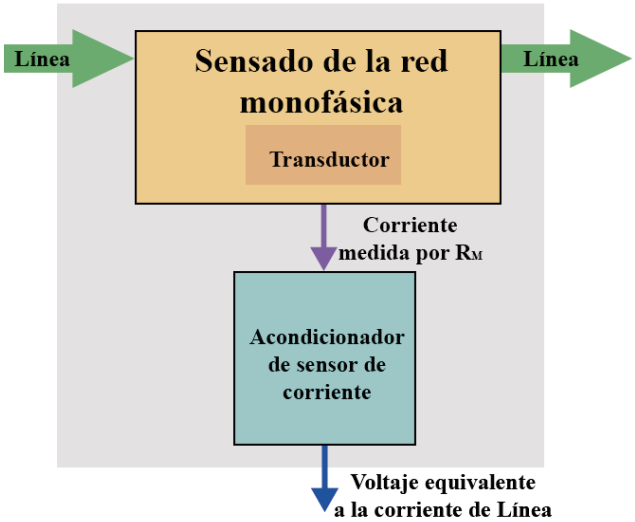


Figura 6. Diagrama de la tarjeta de sensado de corriente.

El bloque denominado “Sensado de la red monofásica” comprende la parte donde se utiliza el transductor de corriente para conectarlo a la línea a partir de la configuración de los pines de entrada y

salida, esto quiere decir que, el circuito donde se requiera medir corriente tiene que ser abierto para colocar el transductor.

3.1 Resistencia y voltaje de medición

A partir de su medición, el transductor dará a la salida una corriente proporcional a la que pasa por la línea de entrada, es por eso que se seleccionó la primera configuración de la Tabla 1, para tener una relación de uno a mil, donde la corriente máxima de entrada serán 25 A_{rms} y la corriente máxima de salida 25 mA_{rms}.

Considerando la corriente entregada en I_S de la Figura 5 se seleccionó una resistencia R_M = *100*Ω para obtener un voltaje de medición V_M=*2.5*V_{rms}. De acuerdo con la ecuación (1) obtenemos el voltaje pico-pico equivalente para a partir de ahí obtener los niveles que deseamos para ser utilizados en un conversor analógico digital (ADC, *analog-to-digital converter*) que normalmente operan en un rango de 0 a 3 V.

$$V_M = 0.025 A_{rms}(100\ \Omega) = 2.5\ V_{rms} = 2.5(2\sqrt{2})V = 7.071068\ V_{pp} \qquad (1)$$

Con esto último, sabemos que tenemos un voltaje de alterna a la entrada con valor de 3.535537V_p, por lo tanto, requerimos cambiar los niveles de alterna a un equivalente de 3V_{pp} o 1.5V_p con una componente en DC de 1.5 V.

3.2 Circuito de acoplamiento

Para acoplar impedancias entre el transductor y el circuito de acondicionamiento, se empezó por utilizar un amplificador operacional en configuración seguidor, como se muestra en la Figura 7. Con esta configuración aseguramos que el voltaje de medición será el mismo a la entrada y a la salida del amplificador operacional.

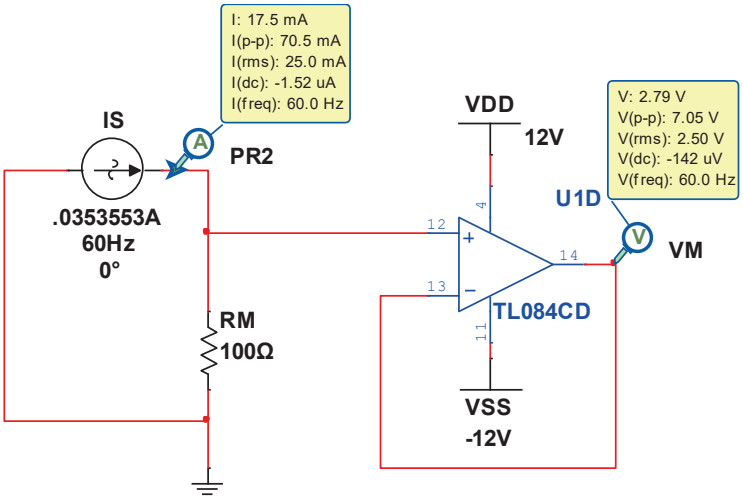


Figura 7. Acoplamiento de impedancias.

3.3 Ajuste de los niveles de voltaje

En la siguiente parte del circuito, después de obtener V_M cambiamos los niveles de voltaje por medio de un cambio de ganancia en un amplificador operacional en configuración de inversor, con el objetivo de obtener un voltaje de salida V_o=*3* V_{pp}.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 16, pp.198 - 211, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Sabemos que el voltaje de entrada V_i es igual a V_M, por lo que V_i =7.071068 V_{pp}. La ganancia requerida por el amplificador está dada por:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{3\ V_{pp}}{7.071068\ V} = 0.424264 \qquad (2)$$

Una vez obtenida la ganancia necesaria en la ecuación (2) sabemos que la ganancia del amplificador operacional está dada por -R_2/R_1, de acuerdo con el circuito de la Figura 8. Con base en lo anterior, se calcularon los valores de las resistencias (proponiendo una y calculando la faltante) para obtener una ganancia muy cercana a la requerida como se muestra en la ecuación (3).

$$-\frac{R_2}{R_1} = -\frac{5.1\ k\Omega}{12\ k\Omega} = -0.425 \qquad (3)$$

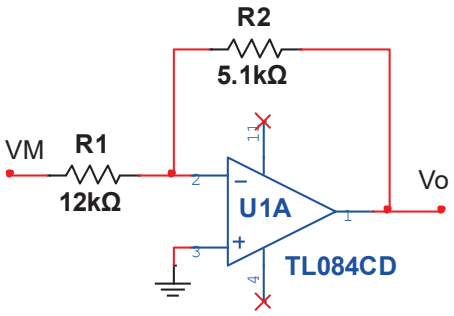


Figura 8. Amplificador inversor calculado.

Estos valores se simularon para corroborarlos antes de armar el circuito final. Como se puede ver en la Figura 9, a partir de una corriente de 25 mA_{rms} obtenemos un voltaje V_o = 3 V_{pp}, el cual es el requerido para ser utilizado en un ADC, y aunque los niveles son adecuados, aún falta pasar la señal por otras etapas, ya que aún tenemos voltajes de ±1.5 V_p.

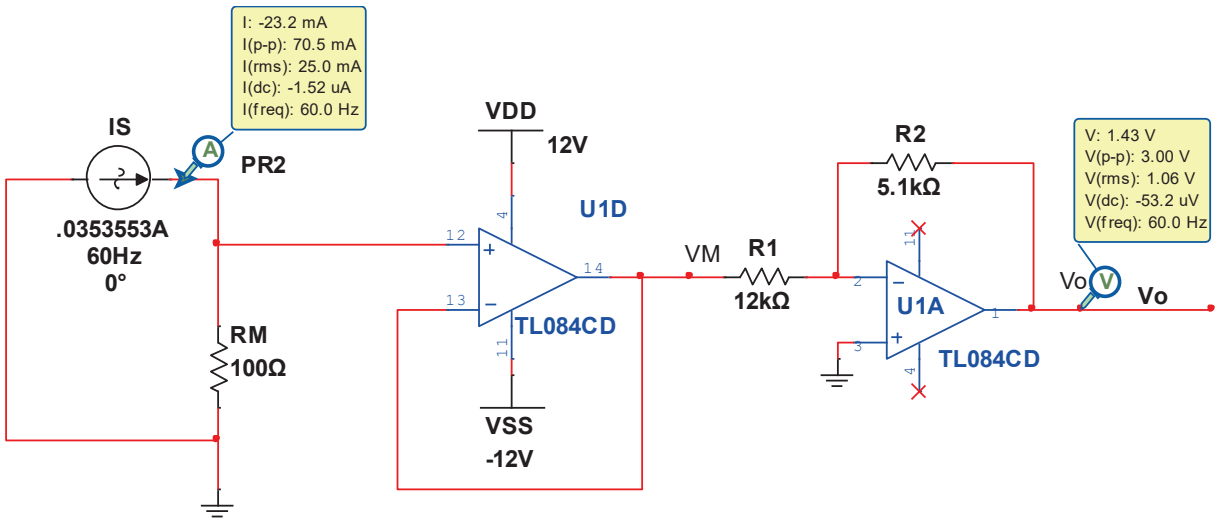


Figura 9. Simulación de corriente rms y voltaje pico-pico.

3.4 Componente en DC

Para eliminar la parte negativa de la señal, se requiere agregar una componente en DC de 1.5 V para así mantener los 3 V_{pp} pero en un intervalo de 0 a 3 V como se muestra en la Figura 10, donde la señal en rojo, representa la señal obtenida en V_o de la Figura 9, y la señal azul es la que se desea obtener, la línea en verde indica la componente en DC de 1.5 V.

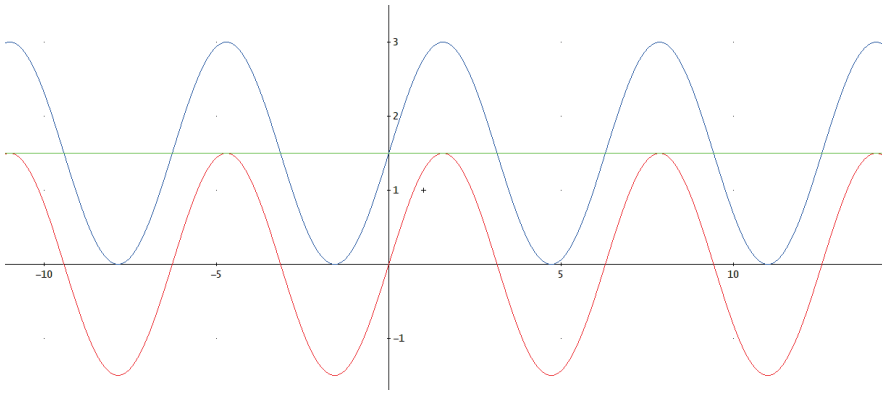


Figura 10. Representación de la señal actual en V_o (rojo) y la requerida (azul) con su componente en DC (verde).

Para lograr lo anterior, se utilizó un amplificador restador, para poder calcular el voltaje de la componente de DC, sin la necesidad de que este dependa de una sola resistencia como lo sería en el amplificador sumador. El circuito utilizado se muestra en la Figura 11.

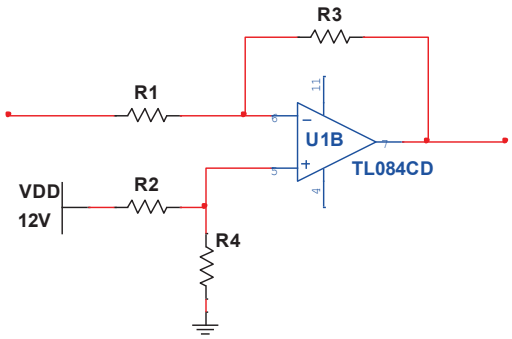


Figura 11. Circuito del amplificador restador.

La ecuación del amplificador restador está dada por:

$$V_o = V_2 \frac{(R_3 + R_1)R_4}{(R_4 + R_2)R_1} - V_1 \frac{R_3}{R_1} \quad (4)$$

Donde V_1 es nuestra señal sin componente de DC, por lo que haremos que R_3 sea igual a R_1 para no cambiar los valores de dicha señal.

Con lo anterior mencionado, la parte restante de la ecuación (4) sería el voltaje de la componente de DC, por lo que:

$$V_2 \frac{(R_3 + R_1)R_4}{(R_4 + R_2)R_1} = 1.5 \ V \quad (5)$$

Para evitar mayor número de conexiones y creación de voltajes por otros métodos, establecemos V_2=12V, que se obtiene de la alimentación del transductor y de los amplificadores operacionales, también se propuso R_1=R_3=10 kΩ, y se tiene:

$$1.5 = 12 \frac{(10+10)R_4}{(R_4 + R_2)10}$$
$$\therefore R_2 = 15R_4 \quad (6)$$

Con los valores de la ecuación (6) se propone R_4=1 kΩ y R_2=15 kΩ, estos se comprobaron por medio de simulaciones como se muestra en la Figura 12, donde mantenemos los 3 V_{pp} con una componente DC de 1.5 V.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 16, pp.198 - 211, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

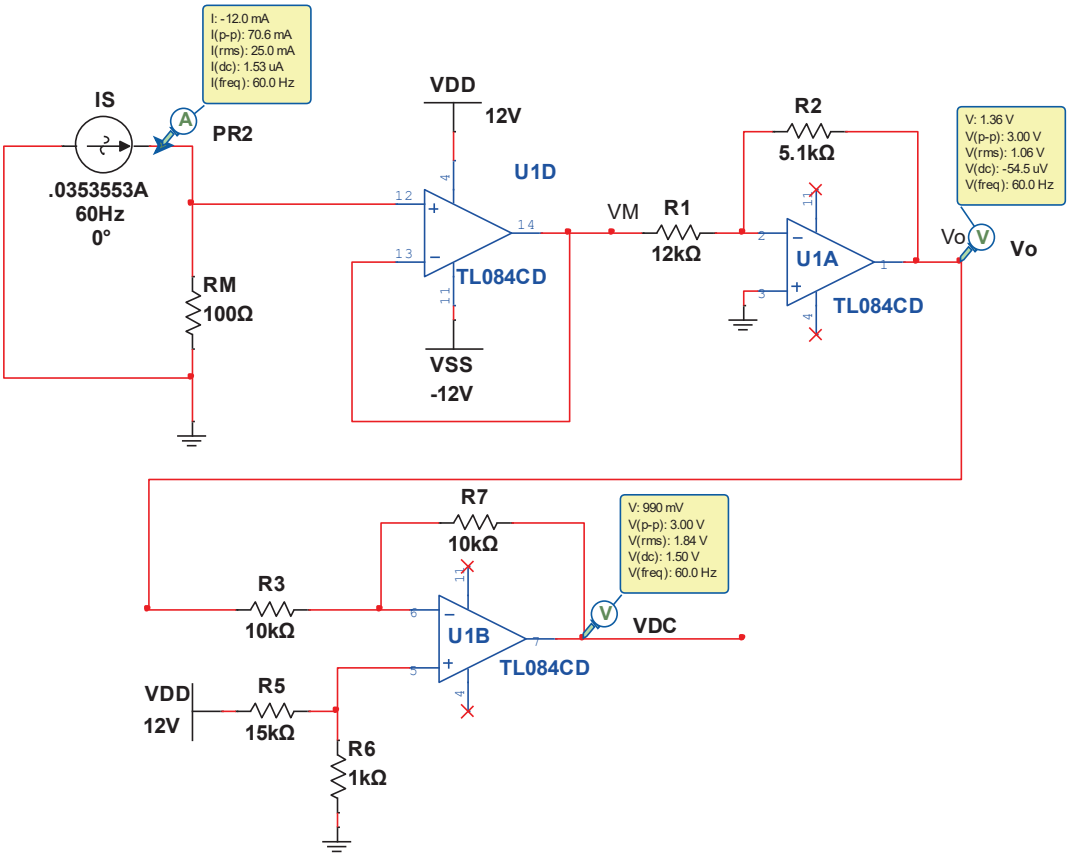


Figura 12. Circuito para la obtención de 3 V_{pp} con una componente DC de 1.5 V.

3.5 Filtro pasa bajas y seguidor

Por último, como el circuito se consideró para ser probado en una señal AC de 60 Hz, se añadió un filtro pasa bajas para filtrar el ruido de altas frecuencias. Por último, se volvió a añadir un seguidor de voltaje, véase Figura 13, para asegurar que los niveles de voltaje se mantengan al final del circuito.

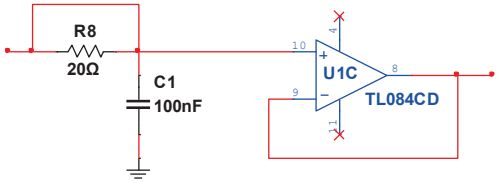


Figura 13. Filtro pasa bajas y seguidor del final del circuito.

4. Pruebas y resultados

En la Figura 14, podemos ver la tarjeta diseñada, en la parte superior tenemos los cables de la línea de alterna a medir (Line In y Line Out), por lo que hay que hacer la conexión en serie para medir corriente. Para la alimentación del circuito se utilizó la nemotecnia de colores de la Tabla 2.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 16, pp.198 - 211, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

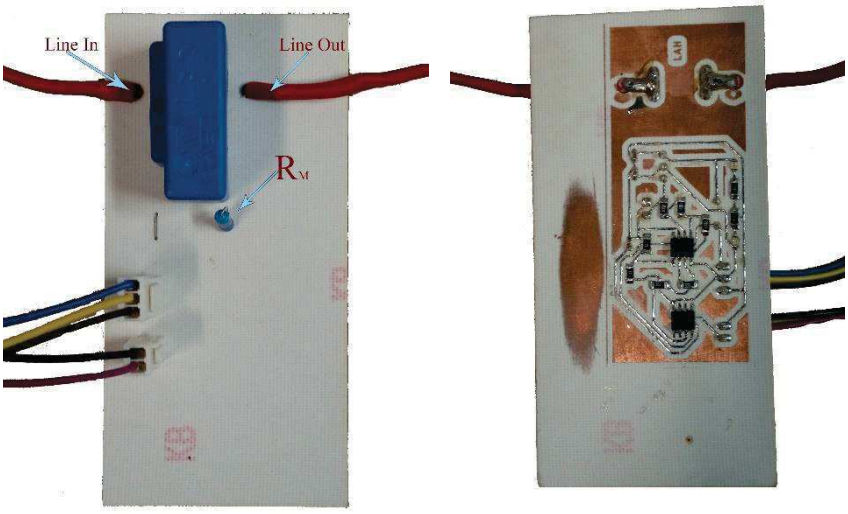


Figura 14. Circuito en PCB de la tarjeta de sensado.

Tabla 2. Nemotecnia de colores utilizados.

+12V	Amarillo
-12V	Azul
GND	Negro
Salida acondicionada	Morado

Para probar el circuito se consideró una medición sin carga (0 A), un taladro pequeño y una pistola de aire caliente, que se describen en las subsecciones siguientes.

4.1 Pruebas sin carga (0A)

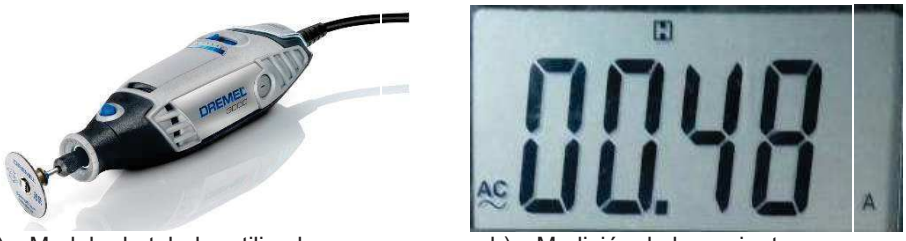
Como el acondicionamiento para el transductor se hizo para medir corrientes en AC, en la salida ya acondicionada, obtendremos un valor en AC de 0 a 1.060660 V_{rms} o 3 V_{pp} que es el equivalente a 1.5 V_p con la componente de DC (*offset*) de 1.5 V. De acuerdo con lo anterior tendríamos 0.042426 V_{rms} por Ampere medido. Como esta señal se ajustó en un *offset* de 1.5 V siempre existirá una componente en DC que mida este valor, como se muestra en la Figura 15.

a) Valor medido en AC (V_{rms}). b) Valor medido en DC.

Figura 15. Mediciones sin carga (0 A).

4.2 Prueba con carga de 0.48 A

Para estas pruebas se conectó un taladro pequeño que consume 0.48 A como se muestra en la Figura 16, donde se ilustra su respectiva medición de corriente.



a) Modelo de taladro utilizado b) Medición de la corriente

Figura 16. Medición de la corriente del taladro pequeño.

De acuerdo con estas mediciones, y con los cálculos del acondicionamiento, se debería tener:

$$V_{out} = 0.042426 \ V_{rms}(0.48) = 0.020365 \ V_{rms} \quad (7)$$

Se tomó la medición con un multímetro para comprobar el valor, como se muestra en la Figura 17, el valor tiene una diferencia de aproximadamente 0.002 V.

Figura 17.Medición de la salida acondicionada con carga de 0.48A.

4.3 Prueba con carga de 6.81 A

Para estas pruebas se conectó una pistola de aire caliente que consume 0.48 A como se muestra en la

Figura 18.

a) Modelo de pistola utilizada b) Medición de la corriente

Figura 18.Medición de la corriente de la pistola de aire caliente.

De acuerdo con estas mediciones, y con los cálculos del acondicionamiento, se debería tener:

$$V_{out} = 0.042426 \ V_{rms}(6.81) = 0.2889 \ V_{rms} \quad (8)$$

La medición tomada con el multímetro se muestra en la Figura 19.

Figura 19.Medición de la salida acondicionada con carga de 6.81 A.

Los cálculos y mediciones de las diferentes cargas se resumen en la Tabla 3, donde se muestra el voltaje calculado en V_{rms} que es el valor que se debería obtener en la medición a partir de la corriente de la carga, el voltaje medido es el valor que se obtuvo con un multímetro digital, el error relativo se obtuvo mediante los datos del voltaje medido y calculado.

Tabla 3. Cálculos y mediciones de la tarjeta de sensado.

Corriente de carga (A_{rms})	Voltaje calculado (V_{rms})	Voltaje medido (V_{rms})	Componente de DC medida (V_{dc})	Equivalencia del voltaje medido en A_{rms}	Error relativo %
0	0	0	1.475	0	0.00000%
0.48	0.020364	0.018	1.475	0.4242681	11.61080%
6.81	0.288921	0.268	1.475	6.3168812	7.24110%

5. Conclusiones

El diseño de la tarjeta de sensado respecto a los cálculos y simulaciones resultó dar valores muy precisos. En la práctica los valores fueron muy diferentes, empezando por el valor de la componente en DC que tiene un error de 0.025 V, esto se le atribuye a la tolerancia de los componentes utilizados, principalmente en que no se consideró, que, para asegurar una mejor medida desde el transductor, se hubiera utilizado una resistencia de precisión en R_M y no una común con una tolerancia de ±5% como se ve en la Figura 14.

Por otro lado, el instrumento de medición que se utilizó para medir los voltajes puede tener una linealidad de error muy mala para los voltajes pequeños, ya que como se aprecia en la Tabla 3, para una medida de corriente mayor, el error relativo disminuye, cuando se esperaría que aumentara.

Para un trabajo futuro, se pretende utilizar un transductor de corriente y voltaje de la misma marca para poder obtener medidas de las dos variables y otros datos como la potencia. Se debe considerar utilizar componentes con tolerancia menor o igual al 1% para esperar resultados de error relativo más pequeños, en este trabajo no fue un factor de importancia, ya que el funcionamiento de la tarjeta era el objetivo de este, más adelante se realizará una tarjeta de mejor calidad donde se prueben parámetros como precisión, exactitud y repetibilidad.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Secretaria de Investigación y Posgrado del IPN, con el proyecto de número de registro SIP: 2018300.

Referencias

[1] R. P. Areny, *Sensores y acondicionadores de señal: prácticas*. Marcombo, 2003.
[2] L. G. C. Ramírez, G. S. A. Jiménez, and J. M. Carreño, *Sensores y Actuadores:* Grupo Editorial Patria, 2014.
[3] E. M. Pérez, P. M. Espiñeira, and A. L. Ferreiro, *Instrumentación electrónica*. Marcombo, 1995.
[4] R. P. Areny, *Adquisición y distribución de señales*. Marcombo, 1993.
[5] K. T. V. Grattan and Y. N. Ning, "Optical current sensor technology," in *Optical Fiber Sensor Technology*, Boston, MA: Springer US, 1999, pp. 183–223.
[6] R. L. Boylestad and C. M. Barraza, *Introducción al análisis de circuitos*. Pearson Educación, 2004.
[7] LEM USA inc., "Current Transducer LAH 25-NP." p. 3, 2017.
[8] LEM USA inc., "Closed Loop Transducers with small footprint up to 100 A nominal," *Physics Today*. p. 12, 2003.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 17, pp. 212 - 227, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Implementación de un Sistema de Control de Transmisión Directa en un Cuadricóptero Utilizando FPGA

Carreón Díaz de León C.L.[1], Vergara Limon S.[1], Palomino Merino D.A.[1], Reyes Cortés J. F.[1], Vargas Treviño M. A. D[1].

Facultad de Ciencias de la Electrónica, Maestría en Ciencias de la Electrónica opción Automatización.
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Puebla, Puebla, México
dermandad@hotmail.com

Resumen

En este trabajo se presenta la implementación de un sistema de control de transmisión directa en un cuadricóptero utilizando un sistema embebido diseñado en FPGA, el cual está basado en un microprocesador diseñado en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Se utilizan servomotores de transmisión directa para implementar estructuras de control basadas en el modelo dinámico. Se realiza un análisis de estabilidad en el sentido de Lyapunov el cual permite verificar que el sistema de lazo cerrado es asintóticamente estable. Se muestra un filtro discreto el cual no provoca retardos de tiempo en las señales de velocidad. La posición en el espacio se obtiene mediante una técnica de aproximación en investigación por la MCEA, además, se obtienen resultados de orientación adecuados para la implementación de sistemas de control.

Palabras clave: Transmisión directa, FPGA, Microprocesador, Estabilidad.

1. Introducción

La investigación de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) ha incrementado debido a las diversas aplicaciones de las aeronaves, tales como la vigilancia [1], asistencia médica [2], y sistemas de seguridad. Uno de los UAV con alto impacto es el cuadricóptero ya que su dinámica permite entender la construcción y funcionamiento de los multicópteros [3].

En la literatura científica, se encuentra reportado distintas metodologías para obtener la posición del cuadricóptero, desde cámaras [4], GPS [5] y sistemas de medición inercial [6]. La obtención de la posición sigue siendo un problema abierto debido a que las soluciones propuestas no alcanzan a cubrir los requerimientos de precisión, exactitud y portabilidad, necesarios para un vuelo autónomo independiente del entorno.

Los sistemas embebidos utilizados para el desarrollo de cuadricópteros están basados en microprocesadores comerciales [7], y microcontroladores montados en tarjetas. Los lenguajes de programación utilizados ofrecen respaldo de la comunidad científica debido a que se tiene una base de conocimiento en internet, sin embargo, la arquitectura de los lenguajes de programación no está siempre disponible para los usuarios.

El estudio del modelo dinámico permite analizar estructuras de control de transmisión directa las cuales son consideradas entradas directas del cuadricóptero, lo cual implica que los actuadores utilizados son lineales con respecto a la señal de entrada. La implementación de estructuras de control de transmisión directa conlleva a obtener desempeños adecuados los cuales pueden ser evaluados

en simulación considerando que se conoce el modelo dinámico del sistema por lo que es una técnica de alto impacto en el diseño de aeronaves.

2. Diagrama general del sistema

El cuadricóptero está construido con cuatro barras conectadas a un punto común en forma ortogonal. En los extremos finales de cada barra, hay un motor colocado. Se utilizan cuatro hélices, uno por cada motor para proporcionar una fuerza de sustentación como se muestra en la figura 1:

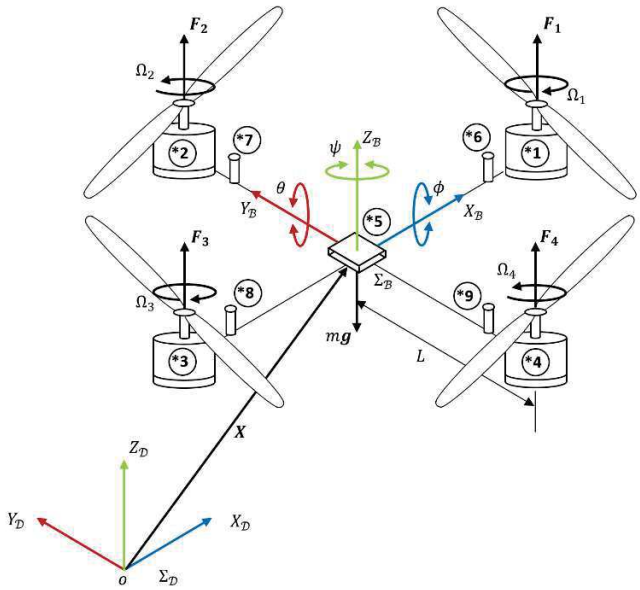


Figura 1. Esquema del cuadricóptero.

.

El sistema de control ha sido implementado en un FPGA, utilizando un microprocesador [9], y un lenguaje de programación, ambos diseñados en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla:

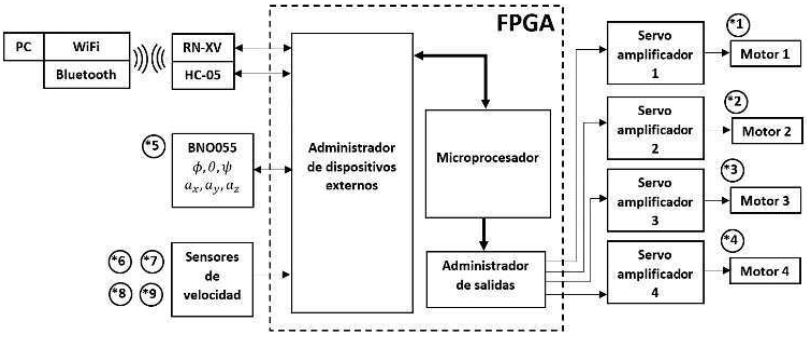


Figura 2. Esquema del sistema embebido.

.

En la figura 2, se observa que los sensores y servo amplificadores son conectados a bloques de firmware localizados dentro del FPGA; el administrador de dispositivos externos se encarga de adquirir la información proveniente de los sensores y gestiona la programación de la memoria del microprocesador, mientras que el administrador de salida envía las señales de control a los servo amplificadores. El microprocesador realiza las operaciones matemáticas necesarias para el control del cuadricóptero y es programado mediante wifi.

3. Modelo dinámico

El comportamiento del movimiento con respecto al tiempo está determinado por las ecuaciones de Euler-Lagrange:

$$\mathcal{L}[\boldsymbol{q}(t),\dot{\boldsymbol{q}}(t)] = K[\boldsymbol{q}(t),\dot{\boldsymbol{q}}(t)] - U[\boldsymbol{q}(t)] \tag{1}$$
$$\tau_i(t) - f_i[\dot{q}_i(t)] = \frac{d}{dt}\left[\frac{\partial}{\partial \dot{q}_i(t)}\mathcal{L}[\boldsymbol{q}(t),\dot{\boldsymbol{q}}(t)]\right] - \frac{\partial}{\partial q_i(t)}\mathcal{L}[\boldsymbol{q}(t),\dot{\boldsymbol{q}}(t)]$$

donde

i:	lésima articulación
$\tau_i(t)$:	Torque en i
$f_i[\dot{q}_i(t)]$:	Torque de fricción en i
$q_i(t)$:	Coordenada generalizada i
$\boldsymbol{q}(t)$:	Vector de coordenadas generalizadas
$K[\boldsymbol{q}(t),\dot{\boldsymbol{q}}(t)]$:	Energía cinética
$U[\boldsymbol{q}(t)]$:	Energía potencial.

Para el cuadricóptero, se tiene que el vector de coordenadas generalizadas es el siguiente:

$$\boldsymbol{q}(t) = [x(t) \quad y(t) \quad z(t) \quad \phi(t) \quad \theta(t) \quad \psi(t)]^T, \qquad \frac{d}{dt}\boldsymbol{q}(t) = \dot{\boldsymbol{q}}(t) \tag{2}$$

donde la energía cinética está determinada por la siguiente ecuación:

$$K_1[\boldsymbol{q}(t),\dot{\boldsymbol{q}}(t)] = \frac{1}{2}I_{xx}p^2(t) + \frac{1}{2}I_{yy}q^2(t) + \frac{1}{2}I_{zz}r^2(t) + \frac{1}{2}m[\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t) + \dot{z}^2(t)] \tag{3}$$

donde p, q y r son las velocidades angulares de la estructura del cuadricóptero, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} son los momentos de inercia y m es la masa. Al utilizar la siguiente matriz de rotación [10]:

$$s(\alpha) = \sin(\alpha), \quad c(\alpha) = \cos(\alpha) \tag{4}$$
$$R[\phi(t),\theta(t),\psi(t)] = \begin{bmatrix} c\psi(t)c\theta(t) & c\psi(t)s\phi(t)s\theta(t) - c\phi(t)s\psi(t) & s\phi(t)s\psi(t) + c\phi(t)c\psi(t)s\theta(t) \\ c\theta(t)s\psi(t) & c\phi(t)c\psi(t) + s\phi(t)s\psi(t)s\theta(t) & c\phi(t)s\psi(t)s\theta(t) - c\psi(t)s\phi(t) \\ -s\theta(t) & c\theta(t)s\phi(t) & c\phi(t)c\theta(t) \end{bmatrix}$$

se tiene:

$$\boldsymbol{\omega}(t) = [p(t) \quad q(t) \quad r(t)]^T \tag{5}$$
$$\begin{bmatrix} p(t) \\ q(t) \\ r(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\theta(t) \\ 0 & c\phi(t) & c\theta(t)s\phi(t) \\ 0 & -s\phi(t) & c\theta(t)c\phi(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \dot{\psi}(t) \end{bmatrix}$$

El Lagrangiano se determina sustituyendo la ecuación (5) en la ecuación (3), obteniendo la ecuación (6):

$$\mathcal{L}_1[\boldsymbol{q}(t),\dot{\boldsymbol{q}}(t)] = I_{xx}[\dot{\phi}(t) - \dot{\psi}(t)s\theta(t)]^2 + \frac{1}{2}I_{yy}\left[\dot{\theta}(t)c\phi(t) + \dot{\psi}(t)c\theta(t)s\phi(t)\right]^2 + \frac{1}{2}I_{zz}\left[\dot{\psi}(t)c\phi(t)c\theta(t) - \dot{\theta}(t)s\phi(t)\right]^2 + \frac{1}{2}m[\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t) + \dot{z}^2(t)] - mgz(t) \tag{6}$$

.

Aplicando las ecuaciones de Euler Lagrange, se obtiene el modelo dinámico y considerando que $\boldsymbol{q}(t) = \boldsymbol{q}$, se tiene la siguiente ecuación diferencial no lineal:

$$\boldsymbol{\tau} = M(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + C(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + K_f f(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{g} \tag{7}$$

donde
Matriz de inercia:

$$M_1 = \text{diag}\{m \quad m \quad m\} \tag{8}$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & -I_{xx}s\theta \\ 0 & I_{yy}c^2\phi + I_{zz}s^2\phi & (I_{yy} - I_{zz})c\phi s\phi c\theta \\ -I_{xx}s\theta & (I_{yy} - I_{zz})c\phi s\phi c\theta & I_{xx}s^2\theta + I_{yy}s^2\phi c^2\theta + I_{zz}c^2\phi c^2\theta \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$Z = \text{diag}\{0 \quad 0 \quad 0\} \tag{10}$$

$$M(\boldsymbol{q}) = \begin{bmatrix} M_1 & Z \\ Z & M_2 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6\times 6} \tag{11}$$

.
Matriz de coriolis

$$\begin{aligned}
c_{11} &= 0 \\
c_{12} &= (I_{yy} - I_{zz})(\dot{\theta}c\phi s\phi + \dot{\psi}s^2\phi c\theta) + (I_{zz} - I_{yy})(\dot{\psi}c^2\phi c\theta) - I_{xx}\dot{\psi}c\theta \\
c_{13} &= (I_{zz} - I_{yy})\dot{\psi}c\phi s\phi c^2\theta \\
c_{21} &= (I_{zz} - I_{yy})(\dot{\theta}c\phi s\phi + s^2\phi c\theta) + (I_{yy} - I_{zz})\dot{\psi}c^2\phi c\theta + I_{xx}\dot{\psi}c\theta \\
c_{22} &= (I_{zz} - I_{yy})\dot{\phi}c\phi s\phi \\
c_{23} &= -I_{xx}\dot{\psi}s\theta c\theta + I_{yy}\dot{\psi}s^2\phi c\theta s\theta + I_{zz}\dot{\psi}c^2\phi s\theta c\theta \\
c_{31} &= (I_{yy} - I_{zz})\dot{\psi}c^2\theta s\phi c\phi - I_{xx}\dot{\theta}c\theta \\
c_{32} &= (I_{zz} - I_{yy})(\dot{\theta}c\phi s\phi s\theta + \dot{\phi}s^2\phi c\theta) + (I_{yy} - I_{zz})\dot{\theta}c^2\phi c\theta + I_{xx}\dot{\psi}s\theta c\theta - I_{yy}\dot{\psi}s^2\phi s\theta c\theta \\
&\quad - I_{zz}\dot{\psi}c^2\phi s\theta c\theta \\
c_{33} &= (I_{yy} - I_{zz})\dot{\phi}c\phi s\phi c^2\theta - I_{yy}\dot{\theta}s^2\phi s\theta c\theta - I_{zz}\dot{\theta}c^2\phi s\theta c\theta + I_{xx}\dot{\theta}c\theta s\theta
\end{aligned} \tag{12}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}$$

$$C(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) = \begin{bmatrix} Z & Z \\ Z & C_1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6\times 6} \tag{13}$$

.
Matriz de fricción

$$K_{f_1} = \text{diag}\{k_{x_f} \quad k_{y_f} \quad k_{z_f} \quad k_{\tau_p} \quad k_{\tau_q} \quad k_{\tau_r}\} \tag{14}$$

.
Vector de velocidad

$$\boldsymbol{g} = [0 \quad 0 \quad mg \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \tag{15}$$

.
Función de velocidad

$$f(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z} \quad (\dot{\phi} - \text{s}\theta\dot{\psi}) \quad (c\phi\dot{\theta} + s\phi c\theta\dot{\psi}) \quad (c\phi c\theta\dot{\psi} - s\phi\dot{\theta})]^T \tag{16}$$

.

Para el modelo dinámico de la hélice, se tiene la siguiente ecuación diferencial [11]:

$$\boldsymbol{\tau_{\Omega}} = J\dot{\boldsymbol{\Omega}} + K_{\tau}\,\boldsymbol{\Omega}^2 + B_f\boldsymbol{\Omega} \in \mathbb{R}^4 \tag{17}$$

donde
$\Omega_i \mid i = \{1,2,3,4\}$: velocidades angulares de las hélices

$$\boldsymbol{\Omega} = [\Omega_1 \quad \Omega_2 \quad \Omega_3 \quad \Omega_4]^T \tag{18}$$

$$\boldsymbol{\Omega}^2 = [\Omega_1^2 \quad \Omega_2^2 \quad \Omega_3^2 \quad \Omega_4^2]^T \tag{19}$$

.
Matriz de inercia de rotores

$$J = \text{diag}\{J_1 \quad J_2 \quad J_3 \quad J_4\} \tag{20}$$

Matriz de fricción cuadrática

$$K_{\tau} = \text{diag}\{k_{\tau 1} \quad k_{\tau 2} \quad k_{\tau 3} \quad k_{\tau 4}\} \tag{21}$$

Matriz de fricción lineal

$$B_f = \text{diag}\{b_{f_1} \quad b_{f_2} \quad b_{f_3} \quad b_{f_4}\} \tag{22}$$

.

4. Estructuras de control de transmisión directa

La estructura de control diseñada está basada en la transmisión de energía mecánica al cuadricóptero, considerando el modelo dinámico descrito en la ecuación (7):

$$\begin{gathered}\boldsymbol{\tau} = K_p \tanh(K_s\tilde{\boldsymbol{q}}) - K_v \tanh\left(K_{s_v}\dot{\boldsymbol{q}}\right) + \boldsymbol{g} \in \mathbb{R}^6 \\ K_p \tanh(K_s\tilde{\boldsymbol{q}}) - K_v \tanh\left(K_{s_v}\dot{\boldsymbol{q}}\right) + \boldsymbol{g} = M(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + K_f f(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{g}\end{gathered} \tag{23}$$

donde $\boldsymbol{q}_d$ es el vector de posiciones deseadas

$$\tilde{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{q}_d - \boldsymbol{q} \tag{24}$$

$$\begin{aligned} K_p &= \text{diag}\{k_{p_x} \quad k_{p_y} \quad k_{p_z} \quad k_{p_\phi} \quad k_{p_\theta} \quad k_{p_\psi}\} \\ K_v &= \text{diag}\{k_{v_x} \quad k_{v_y} \quad k_{v_z} \quad k_{v_\phi} \quad k_{v_\theta} \quad k_{v_\psi}\} \\ K_s &= \text{diag}\{k_{s_x} \quad k_{s_y} \quad k_{s_z} \quad k_{s_\phi} \quad k_{s_\theta} \quad k_{s_\psi}\} \\ K_{s_v} &= \text{diag}\{k_{sv_x} \quad k_{sv_y} \quad k_{sv_z} \quad k_{sv_\phi} \quad k_{sv_\theta} \quad k_{sv_\psi}\} \end{aligned} \tag{25}$$

Al despejar a $\ddot{\boldsymbol{q}}$ y utilizar la estructura de una ecuación diferencial ordinaria, se demuestra la existencia del punto de equilibrio:

$$\begin{bmatrix}\mathbf{0}\\ \mathbf{0}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{q}} \\ M^{-1}(\boldsymbol{q}_d - \tilde{\boldsymbol{q}})\left[K_p \tanh(K_s\tilde{\boldsymbol{q}}) - K_v \tanh(K_{sv}\dot{\boldsymbol{q}}) - C(\boldsymbol{q}_d - \tilde{\boldsymbol{q}},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} - K_f f(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\right]\end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix}\tilde{\boldsymbol{q}}\\ \dot{\boldsymbol{q}}\end{bmatrix} \to \mathbf{0} \tag{26}$$

La función de energía candidata para demostrar estabilidad asintótica es la siguiente:

$$V(\tilde{\boldsymbol{q}},\dot{\boldsymbol{q}}) = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{q}}^T M(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} + \sqrt{\ln[\cosh(K_s\tilde{\boldsymbol{q}})]}^T K_p \sqrt{\ln[\cosh(K_s\tilde{\boldsymbol{q}})]} - \frac{\epsilon \tanh(\tilde{\boldsymbol{q}})^T M(\boldsymbol{q}_d - \tilde{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}}{1 + \mathcal{U}_a(K_p, K_s, \tilde{\boldsymbol{q}})} \tag{27}$$

$$\mathcal{U}_a(K_p, K_s, \tilde{\boldsymbol{q}}) = \sqrt{\ln[\cosh(K_s\tilde{\boldsymbol{q}})]}^T K_p \sqrt{\ln[\cosh(K_s\tilde{\boldsymbol{q}})]} \tag{28}$$

$$\tanh(K_a\boldsymbol{a}) = [\tanh(k_{11}a_1) \quad \tanh(k_{22}a_2) \quad \cdots \quad \tanh(k_{ii}a_i)]^T \in \mathbb{R}^i \tag{29}$$

$$\sqrt{\ln[\cosh(K_a\boldsymbol{a})]} = \left[\sqrt{\ln[\cosh(k_{11}a_1)]} \quad \sqrt{\ln[\cosh(k_{22}a_2)]} \quad \cdots \quad \sqrt{\ln[\cosh(k_{ii}a_i)]}\right]^T \in \mathbb{R}^i \tag{30}$$
$$\forall \boldsymbol{a} \in \mathbb{R}^i, K_a = \text{diag}\{k_{11} \quad k_{22} \quad \cdots \quad k_{ii}\} \in \mathbb{R}^{i\times i}$$

donde, al determinar las cotas mínimas y máximas de la función candidata de energía considerando las siguientes propiedades [8]:

$$\lambda_A^{\min} I \leq A \leq \lambda_A^{\max} \mid \det(A) > 0, a_{11} > 0, A - A^T = 0 \tag{31}$$

$$\lambda_{M(\boldsymbol{q})}^{\min} I \leq M(\boldsymbol{q}) \leq \lambda_{M(\boldsymbol{q})}^{\max} \Leftrightarrow \boldsymbol{u}^T M(\boldsymbol{q})\boldsymbol{u} > 0 \mid \|\boldsymbol{u}\| > 0, \forall \boldsymbol{q} \in \mathbb{R}^6 \tag{32}$$

se tiene que la condición para la constante ϵ que permite que $V(\tilde{\boldsymbol{q}},\dot{\boldsymbol{q}}) > \boldsymbol{0}\ \forall\|\tilde{\boldsymbol{q}}\| < p \mid \exists p > 0, \|\dot{\boldsymbol{q}}\| > 0$ es la siguiente:

$$\exists \epsilon \in \mathbb{R} \Leftrightarrow \tag{33}$$
$$\lambda_{K_s}^{\min}\lambda_{K_p}^{\min}\left\|\sqrt{\ln[\cosh(\tilde{\boldsymbol{q}})]}\right\|^2 - \lambda_{M(\boldsymbol{q}_d-\tilde{\boldsymbol{q}})}^{\max}\epsilon^2\|\tanh(\tilde{\boldsymbol{q}})\|^2 > 0, V(\tilde{\boldsymbol{q}},\dot{\boldsymbol{q}}) > 0, \forall\|\tilde{\boldsymbol{q}}\|, \|\dot{\boldsymbol{q}}\| \neq 0$$

Al derivar la ecuación (4.2) se obtiene la siguiente ecuación:

$$\dot{V}(\tilde{\boldsymbol{q}},\dot{\boldsymbol{q}}) = \left[\dot{\boldsymbol{q}}^T - \frac{\epsilon\tanh(\tilde{\boldsymbol{q}})^T}{1+\mathcal{U}_a(K_p,K_s,\tilde{\boldsymbol{q}})}\right]M(\boldsymbol{q}_d-\tilde{\boldsymbol{q}})\ddot{\boldsymbol{q}} + \frac{1}{2}\left[\dot{\boldsymbol{q}}^T - \frac{\epsilon\tanh(\tilde{\boldsymbol{q}})^T}{1+\mathcal{U}_a(K_p,K_s,\tilde{\boldsymbol{q}})}\right]\dot{M}(\boldsymbol{q}_d-\tilde{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} - \tanh(K_s\tilde{\boldsymbol{q}})^T K_p\dot{\boldsymbol{q}} \tag{34}$$
$$+\frac{\epsilon[(\boldsymbol{1}-\tanh(\tilde{\boldsymbol{q}})^2)\dot{\boldsymbol{q}}]^T M(\boldsymbol{q}_d-\tilde{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}}{1+\mathcal{U}_a(K_p,K_s,\tilde{\boldsymbol{q}})} - \frac{\epsilon\tanh(K_s\tilde{\boldsymbol{q}})^T K_p\dot{\boldsymbol{q}}\tanh(\tilde{\boldsymbol{q}})^T M(\boldsymbol{q}_d-\tilde{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}}{\left[1+\mathcal{U}_a(K_p,K_s,\tilde{\boldsymbol{q}})\right]^2}$$

$$(\boldsymbol{1}-\tanh(\boldsymbol{a})^2)\boldsymbol{b} = [(1-\tanh(a_1)^2)b_1 \quad (1-\tanh(a_2)^2)b_2 \quad \cdots \quad (1-\tanh(a_i)^2)b_i]^T, \qquad \forall \boldsymbol{a},\boldsymbol{b} \in \mathbb{R}^i \tag{35}$$

que se denomina función de potencia.

Hallando la cota máxima de la ecuación cuadrática (34) y considerando las siguientes propiedades [8]:

$$\frac{1}{1+\mathcal{U}_a(K_p,K_s,\tilde{\boldsymbol{q}})} \leq 1 \Leftrightarrow \frac{1}{\left[1+\mathcal{U}_a(K_p,K_s,\tilde{\boldsymbol{q}})\right]^2} \leq 1 \tag{36}$$

$$\frac{\|\tilde{\boldsymbol{q}}\|^2}{\left[1+\mathcal{U}_a(K_p,K_s,\tilde{\boldsymbol{q}})\right]^2} \leq 1 \Leftrightarrow \frac{\|\tilde{\boldsymbol{q}}\|}{1+\mathcal{U}_a(K_p,K_s,\tilde{\boldsymbol{q}})} \leq 1 \tag{37}$$

$$\|C^T(\boldsymbol{q}_d-\tilde{\boldsymbol{q}},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}\| \leq k_C\|\dot{\boldsymbol{q}}\|^2, \qquad k_C > 0 \tag{38}$$

$$\lambda_H^{\min}\|\boldsymbol{y}\|^2 \leq \boldsymbol{y}^T H\tanh(\boldsymbol{y}) \leq \lambda_H^{\max}\|\boldsymbol{y}\|^2 \tag{39}$$

$$\alpha\|\dot{\boldsymbol{q}}\| \leq \left\|\left[\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z} \quad (\dot{\phi}-s\theta\dot{\psi}) \quad (c\phi\dot{\theta}+s\phi c\theta\dot{\psi}) \quad (c\phi c\theta\dot{\psi}-s\phi\dot{\theta})\right]^T\right\| \leq 2\|\dot{\boldsymbol{q}}\| \mid \alpha > 0 \tag{40}$$

se tiene finalmente que la derivada de la ecuación (27) indica estabilidad asintótica local:

$$\dot{V}(\tilde{\boldsymbol{q}},\dot{\boldsymbol{q}}) < -\left(\frac{\epsilon\lambda_{K_p}^{\min}\lambda_{K_s}^{\min}}{1+\mathcal{U}_a(K_p,K_s,\tilde{\boldsymbol{q}})}\right)\|\tilde{\boldsymbol{q}}\|^2 - \left(\alpha\lambda_{K_f}^{\min}+\lambda_{K_v}^{\min}-\epsilon\lambda_{M(\boldsymbol{q}_d-\tilde{\boldsymbol{q}})}^{\max}+\epsilon k_C-\epsilon\lambda_{M(\boldsymbol{q}_d-\tilde{\boldsymbol{q}})}^{\min}\lambda_{K_p}^{\min}\lambda_{K_s}^{\min}\right)\|\dot{\boldsymbol{q}}\|^2 + \left(\epsilon\lambda_{K_v}^{\max}+2\epsilon\lambda_{K_f}^{\max}\right)\|\tilde{\boldsymbol{q}}\|\|\dot{\boldsymbol{q}}\| < 0, \qquad \|\tilde{\boldsymbol{q}}\| < p \mid \exists p > 0 \tag{41}$$

con dos condiciones más sobre ϵ:

$$\left(\frac{\epsilon\lambda_{K_p}^{\min}\lambda_{K_s}^{\min}}{1+\mathcal{U}_a(K_p,K_s,\tilde{\boldsymbol{q}})}\right) > 0 \tag{42}$$

$$\left(\frac{\epsilon\lambda_{K_p}^{\min}\lambda_{K_s}^{\min}}{1+\mathcal{U}_a(K_p,K_s,\tilde{\boldsymbol{q}})}\right)\left(\alpha\lambda_{K_f}^{\min}+\lambda_{K_v}^{\min}-\epsilon\lambda_{M(\boldsymbol{q}_d-\tilde{\boldsymbol{q}})}^{\max}+\epsilon k_C-\epsilon\lambda_{M(\boldsymbol{q}_d-\tilde{\boldsymbol{q}})}^{\min}\lambda_{K_p}^{\min}\lambda_{K_s}^{\min}\right)-\frac{1}{2}\left(\epsilon\lambda_{K_v}^{\max}+2\epsilon\lambda_{K_f}^{\max}\right)^2 > 0 \tag{43}$$

.

Para el control de velocidad de los rotores, se tiene la siguiente estructura de control:

$$\boldsymbol{\tau}_{\boldsymbol{\Omega}} = K_{pr}\tanh\left(K_{sr}\tilde{\boldsymbol{\Omega}}\right) + K_\tau\,\boldsymbol{\Omega}_d^2 + B_f\boldsymbol{\Omega}_d \tag{44}$$

donde $\boldsymbol{\Omega}_d$ es el vector de velocidades deseadas

$$\tilde{\boldsymbol{\Omega}} = \boldsymbol{\Omega}_d - \boldsymbol{\Omega} \tag{45}$$

$$\begin{aligned} K_{pr} &= \mathrm{diag}\{k_{pr_{\Omega 1}} \quad k_{pr_{\Omega 1}} \quad k_{pr_{\Omega 3}} \quad k_{pr_{\Omega 4}}\} \\ K_{sr} &= \mathrm{diag}\{k_{sr_{\Omega 1}} \quad k_{sr_{\Omega 1}} \quad k_{sr_{\Omega 3}} \quad k_{sr_{\Omega 4}}\} \end{aligned} \tag{46}$$

.

El punto de equilibrio es único, considerando que la velocidad deseada y la velocidad del rotor solo son positivas:

$$\dot{\Omega}_i = \frac{1}{J_{z_i}}\left[k_{p_i}\tanh\left(k_{s_i}\tilde{\Omega}_i\right) + b\Omega_{d_i} + k_t\Omega_{d_i}^2 - b\Omega_i - k_t\Omega_i^2\right] = 0 \Leftrightarrow \tilde{\Omega}_i = 0 \mid \Omega_{d_i},\Omega_i \in \mathbb{R}^+ \tag{47}$$

.

La función de energía diseñada es definida positiva globalmente, lo cual satisface la propiedad de una función candidata:

$$V(\tilde{\Omega}_i) = \frac{1}{2}J_{z_i}\tilde{\Omega}_i^2 \quad | \quad V(\tilde{\Omega}_i) > 0, \qquad \forall\tilde{\Omega}_i \neq 0 \tag{48}$$

al derivar la ecuación (48) y sustituir el modelo dinámico de la hélice, se tiene que la ecuación diferencial en lazo cerrado es asintóticamente estable localmente:

$$\dot{V}(\tilde{\Omega}_i) = -\tilde{\Omega}_i k_{p_i}\tanh\left(k_{s_i}\tilde{\Omega}_i\right) - b\tilde{\Omega}_i^2 - k_t\tilde{\Omega}_i\left(\Omega_{d_i}^2 - \Omega_i^2\right) \leq 0, \quad \forall\tilde{\Omega}_i \in \mathbb{R} \mid \Omega_{d_i},\Omega_i \in \mathbb{R}^+ \tag{49}$$

.

En el cuadricóptero se observa que dos hélices giran en sentido opuesto a las hélices que giran en sentido positivo por lo que para que el análisis de estabilidad sea válido, se toma el marco de referencia de las hélices con sentido negativo en sentido opuesto.

5. Implementación del sistema de control

El cuadricóptero es un sistema subactuado el cual utiliza la ecuación (50) para aplicar las entradas mostradas en el modelo dinámico de la ecuación (7):

$$\begin{bmatrix} U \\ \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_f & k_f & k_f & k_f \\ 0 & -k_f L & 0 & k_f L \\ k_f L & 0 & -k_f L & 0 \\ k_m & -k_m & k_m & -k_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \\ \Omega_4^2 \end{bmatrix} \tag{50}$$

$$\begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi)U \\ (s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi)U \\ (c\theta c\phi)U \end{bmatrix} \tag{51}$$

donde k_f y k_m son los coeficientes de empuje y de torsión de la hélice [11], L es la longitud desde el centro de masa hasta la hélice, y U es la fuerza de sustentación del cuadricóptero.

Considerando que los ángulos ϕ y θ se acotan convenientemente tal que sea posible aproximar las entradas cartesianas a la ecuación (52):

$$\begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} (\theta c\psi + \phi s\psi)U \\ (\theta s\psi - \phi c\psi)U \\ U \end{bmatrix} \tag{52}$$

se obtiene finalmente una aproximación de los ángulos para variar la posición en x y y:

$$\begin{bmatrix} \phi_d \\ \theta_d \end{bmatrix} \cong \left(\frac{1}{U}\right) \begin{bmatrix} s\psi & -c\psi \\ c\psi & s\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{x_d} \\ \tau_{y_d} \end{bmatrix} \tag{53}$$

Para la implementación de la estructura de transmisión directa del control de $\boldsymbol{q}$, se utiliza el siguiente diagrama a bloques:

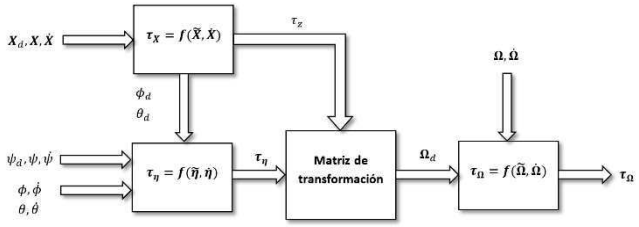


Figura 3. Diagrama de estructura de control.

donde $\boldsymbol{X} = [x \quad y \quad z]^T$, $\boldsymbol{\eta} = [\phi \quad \theta \quad \psi]^T$.

El microprocesador utilizado ha sido desarrollado por la MCEA de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y permite el sistema de control utilizando tres sensores de orientación, tres de posición y cuatro de velocidad. El siguiente diagrama de flujo muestra los sistemas digitales implementados para el control del cuadricóptero:

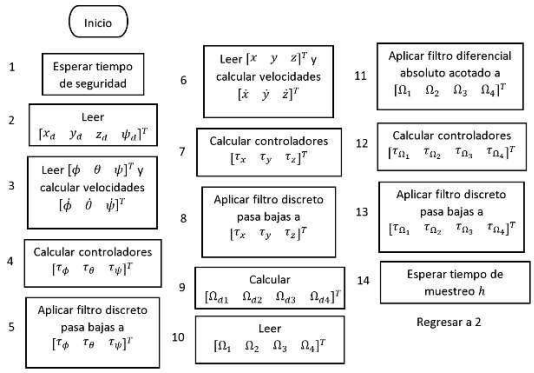


Figura 4. Diagrama a bloques del software del sistema de control.

donde el filtro discreto pasa bajas se muestra en la ecuación (54):

$$x_f(k) = e^{-2\pi f_c h} x_f(k-1) + \left(1 - e^{-2\pi f_c h}\right) x(k-1) \tag{54}$$

donde f_c es la frecuencia de corte y h es el tiempo de muestreo.

El filtro diferencial absoluto acotado permite filtrar discretamente la señal proveniente del sensor de velocidad sin tener retardos de tiempo, lo cual es deseable debido a la rapidez de respuesta del control de velocidad.

Para medir la velocidad de las hélices, se utiliza un sensor óptico el cual mide la frecuencia de giro de la misma para convertirla a revoluciones por minuto:

Figura 5. Sensor de velocidad.

El sensor de orientación utilizado es el dispositivo BNO055 el cual ofrece los tres ángulos utilizados en el modelo dinámico del cuadricóptero:

Figura 6. Sensor de orientación BNO055.

.
Para los sensores de posición, se utilizó una técnica de posicionamiento basada en la siguiente ecuación diferencial:

$$\boldsymbol{X}(t) = K_{fx} \int_0^t \left[\boldsymbol{\tau_X}(\sigma) - m\ddot{\boldsymbol{X}}(\sigma)\right] d\sigma \tag{55}$$

donde $K_{fx} = \text{diag}\{k_{f_x} \quad k_{f_y} \quad k_{f_z}\}$ y $\ddot{\boldsymbol{X}}$ es la aceleración. La ecuación (55) continua en investigación por la MCEA por lo que los resultados mostrados muestran evidencia del funcionamiento del sistema de control de transmisión directa.

Los servo amplificadores utilizados permiten aplicar una variación en ciclo de trabajo de 0 a 100 con incrementos de 0.1 unidades. Utilizan una alimentación de 14.8 a 16.8 volts con una corriente máxima de 20 amperios:

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 17, pp. 212 - 227, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

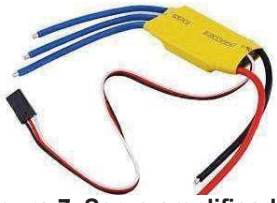


Figura 7. Servo amplificador

El sistema utilizado está basado en una estructura de cuatro barras, la cual soporta los cuatro motores con las hélices, el sistema embebido, la batería y los sensores:

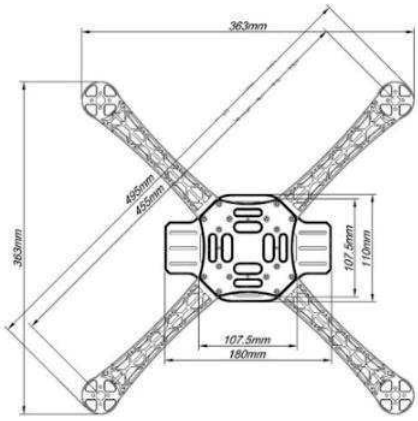


Figura 8. Estructura mecánica del cuadricóptero.

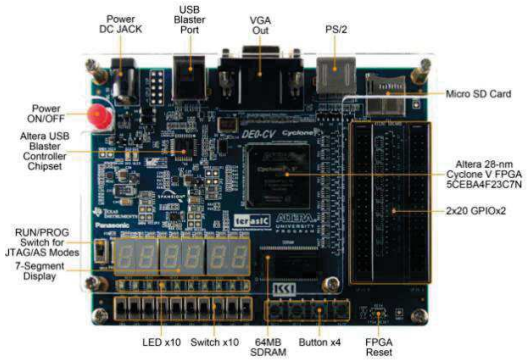


Figura 9. Tarjeta DE0 CV de altera con FPGA.

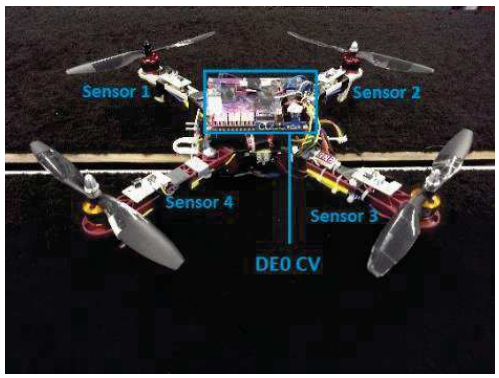


Figura 10. Cuadricóptero mostrando parte superior.

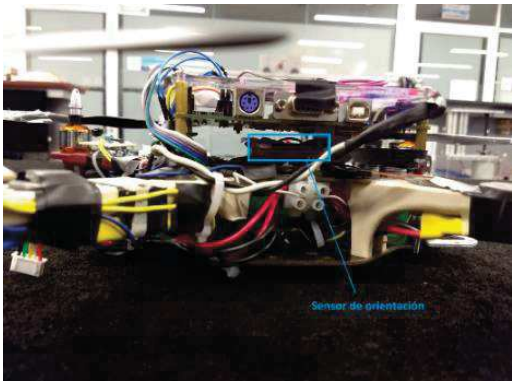


Figura 11. Cuadricóptero visto desde el frente.

.

En las figura 8, se muestra la estructura del cuadricóptero utilizada la cual está construida de plástico ABS. En la figura 9 se muestra la tarjeta DE0 CV que contiene un FPGA para la implementación del sistema de control. En las figuras 10 y 11 se muestra la construcción del cuadricóptero, mostrando los elementos importantes del mismo.

.

La tarjeta DE0 CV utiliza el FPGA 5CEBA4F23C7 de 49,000 elementos lógicos y contiene el firmware diseñado para la adquisición de datos de los sensores, así como la interfaz wifi con la computadora para programar y enviar las posiciones deseadas al sistema de control mediante un software desarrollado en Labview:

Figura 12. Interfaz de usuario en LabView por WIFI.

donde en la figura 12, el cuadro (1) indica los parámetros a enviar por wifi al sistema embebido, (2) indica los botones de conexión al sistema embebido e indican una conexión estable, (3) muestra los botones necesarios para programar la memoria del microprocesador y finalmente (4) indica los sistemas de depuración de la memoria de programa.

6. Resultados

La figura 13 muestra el comportamiento del filtro diferenciador absoluto acotado aplicado a un sensor de velocidad del cuadricóptero:

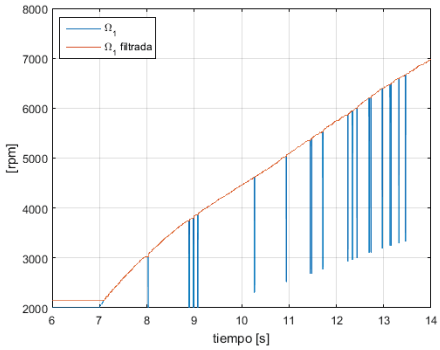


Figura 13. Filtro diferenciador absoluto acotado aplicado a la señal del sensor de velocidad 1.

en la figura 13, se observa que el filtro diseñado no atrasa la señal, permitiendo la utilización del sensor en el control de velocidad.

Los cuatro servomotores son de transmisión directa y están caracterizados utilizando la siguiente ecuación:

$$\tau_{\Omega i} = s_i k_{\Omega_i}, \qquad [\text{CT: ciclo de trabajo } (0:100)] \tag{56}$$

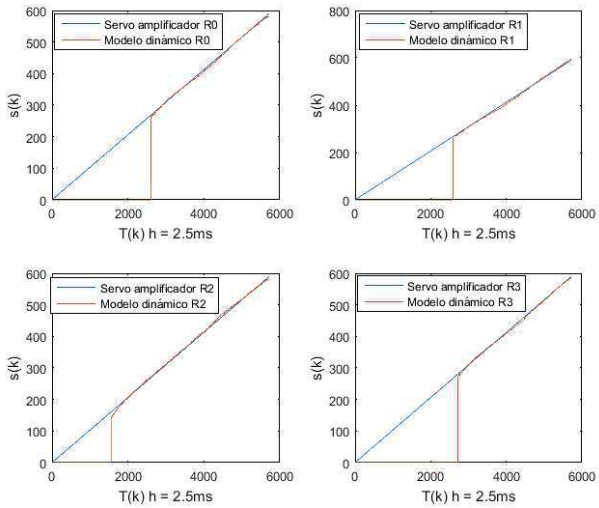


Figura 14. Respuesta de los servomotores.

.

En la figura 14, se observa que la respuesta de los actuadores es lineal con respecto al ciclo de trabaja mostrado, las constantes de torque utilizadas son las siguientes:

Tabla 1. Constantes de torque de los servomotores.

k_{Ω_1}	k_{Ω_2}	k_{Ω_3}	k_{Ω_4}
3.3826[mNm/CT]	3.1496[mNm/CT]	3.361345[mNm/CT]	3.6036[mNm/CT]

.

La respuesta de las coordenadas $[\phi \quad \theta \quad \psi]^T$ indica que la ecuación (53) para obtener los ángulos deseados a partir de las entradas τ_x, τ_y y τ_z es utilizable:

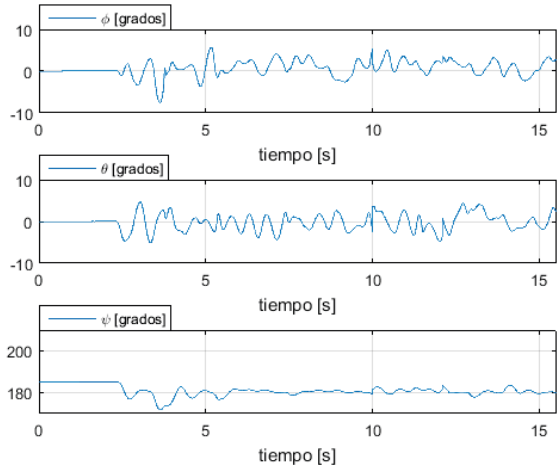


Figura 15. Respuesta de los ángulos del cuadricóptero.

.

En la figura 15, se muestra las entradas τ_x, τ_y y τ_z aplicadas al cuadricóptero:

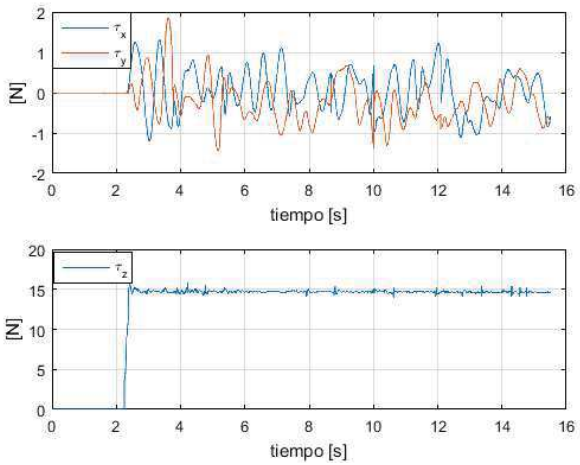


Figura 16. Entradas de coordenadas lineales.

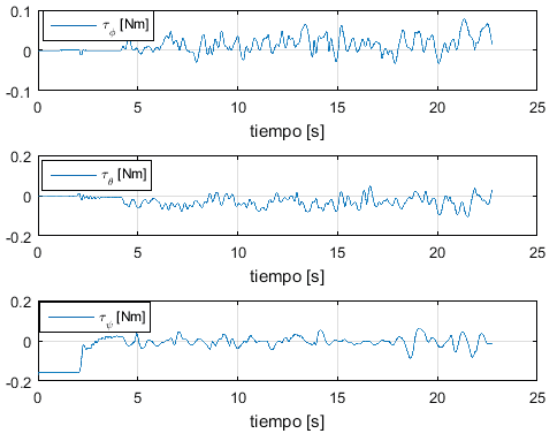


Figura 17. Entradas angulares del cuadricóptero.

.

La técnica de aproximación de la posición continúa en investigación por parte de la Maestría en Ciencias de la Electrónica opción Automatización, por lo que se ha utilizado para comprobar el comportamiento del sistema de control implementado. En la figura 18 y 19, se muestra la

aproximación de la posición cartesiana para una posición deseada de $x_d = 0\,[\mathrm{m}]$, $y_d = 0\,[\mathrm{m}]$ y $z_d = 1.2\,[\mathrm{m}]$, considerando que $\psi_d = 180\,[\mathrm{grados}]$:

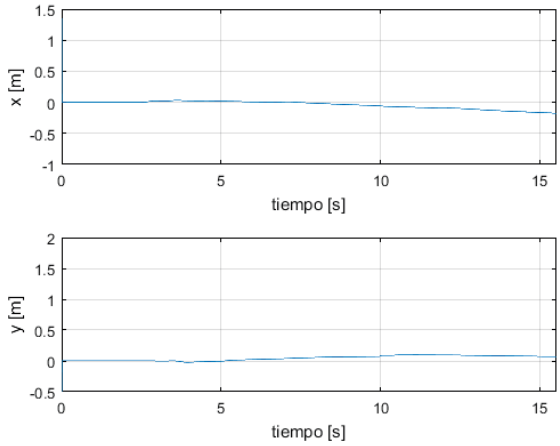


Figura 18. Posición en (x) y (y)

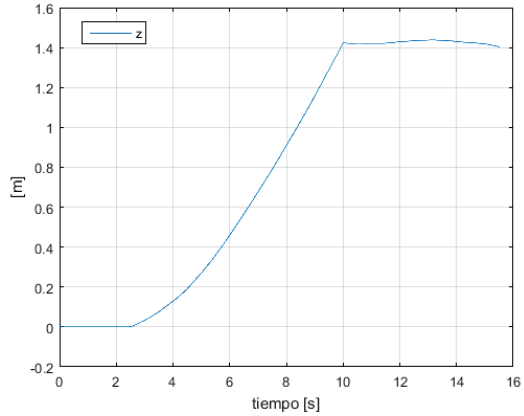


Figura 19. Posición en (z)

.

En las siguientes figuras, se muestra la evidencia del experimento realizado con el cuadricóptero:

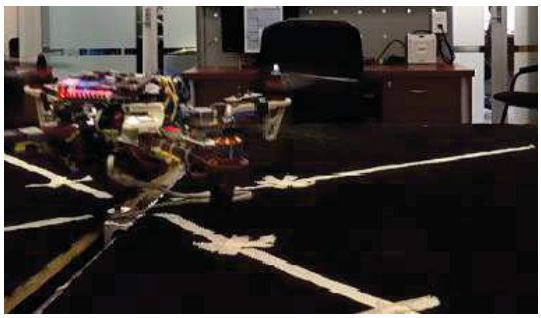


Figura 20. Cuadricóptero despegando.

.

En la figura 20 se muestra el cuadricóptero iniciando el despegue de la plataforma diseñada para realizar experimentación con la aeronave sin que sufra daños por colisión.

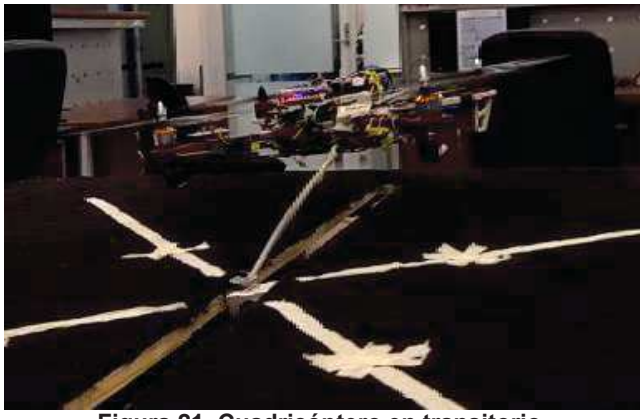


Figura 21. Cuadricóptero en transitorio.

.

En la figura 21, se muestra que el cuadricóptero está en estado transitorio lo cual es debido a la ranura de la plataforma diseñada, por lo que la experimentación se realiza a una altura superior.

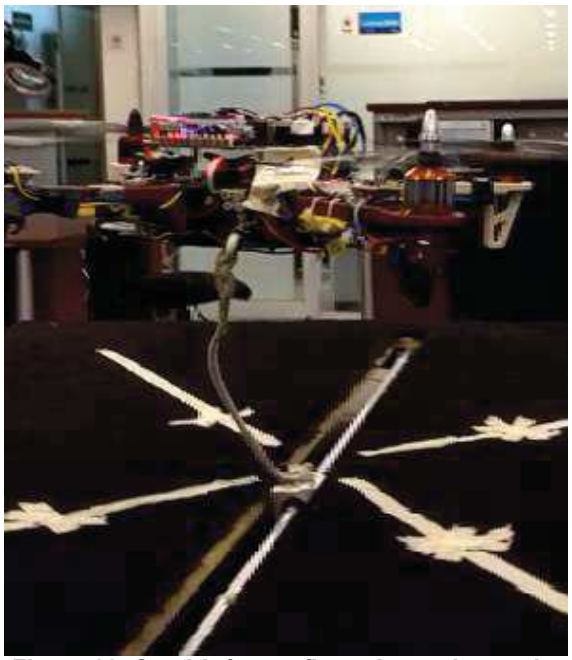


Figura 22. Cuadricóptero flotando en el espacio.

.

En la figura 22, se observa al cuadricóptero flotando una distancia adecuada de la plataforma de pruebas por lo que se mantiene estable en una región acotada.

7. Conclusiones

El estudio del modelo dinámico y el diseño de estructuras de control, permiten implementar sistemas de control, considerando en todo momento la ecuación en lazo cerrado resultante, por lo que es posible implementar a nivel simulación el modelo dinámico y la estructura de control y obtener conclusiones las cuales su nivel de veracidad está en función de la precisión de las ecuaciones diferenciales que describen el movimiento.

El análisis de estabilidad en el sentido de Lyapunov demuestra matemáticamente que la implementación del sistema de control es posible, por lo que el desarrollo de funciones candidatas de

energía se considera de alto impacto y de gran interés cuando se desea tener un sustento matemático adecuado sobre el sistema de control.

Los resultados obtenidos permiten observar que **el sistema de control de transmisión directa trabaja adecuadamente**, sin embargo, se tiene que considerar que la **aproximación de la posición continua en investigación** por lo que es necesario desarrollar más experimentación del sistema.

Las gráficas de los servomotores utilizados indican que **la estructura de control de velocidad basada en los torques de entrada es de transmisión directa por lo que las entradas al cuadricóptero son de transmisión directa**. Esto implica que el análisis de estabilidad es viable considerando que el fenómeno de fricción siempre es disipativo.

El filtro diferenciador absoluto acotado, permite filtrar señales digitales evitando retardos de tiempo los cuales conllevan a oscilaciones no deseadas, entorpeciendo el control de velocidad. Cabe destacar que el **filtro diferenciador es aplicable únicamente a señales discretas con ruido pulsado.**

El trabajo a realizar a corto plazo es la implementación de distintas técnicas de posicionamiento en el espacio, debido a que la técnica mostrada de aproximación de posición es compleja de implementar. Cabe destacar que debido a la característica de transmisión directa del sistema de control, es posible evaluar diversas metodologías para describir el comportamiento del movimiento del cuadricóptero, así como evaluar estructuras de control basadas en que son entradas de las ecuaciones diferenciales del modelo dinámico.

Referencias

[1] Jihun P., Dae Hoe K., Young Sook S. and Sang-ho L., "*A comparison of Convolutional Object Detectors for Real-time Drone Tracking Using a PTZ Camera*" , 2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2017).
[2] Kelly D., "*The future is here: how drones are modernizing the healthcare industry*", Medical Alley Association 2018.
[3] Castillo P., Lozano R. and E. Dzul A. (2005). "*Modelling and Control of Mini-Flying Machines*". USA: Springer
[4] Jia H., Yifeng N. and Zhichao W., "*Obstacle Avoindance Methods for Rotor UAVs using Real Sense Camera*", College of Mechatronic Engineering and Automation and National University of Defense Technology at IEEE 2017 Chinese Automation Congress.
[5] Am C., Young-shin K., Bum-jin P., Chang-sun Y. and Sam-Ok K., "*Altitude Integrations of Radar Altimeter and GPS/INS for Automatic Takeoff and Landing of a UAV*", 2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems IEEE.
[6] Nikbakht S, Masiid M. and Khayatian A, "*Evaluation of Solid-State Acccelerometer for Positioning Vehicle*", IEEE 2005 conference in Hong Kong, China.
[7] Liu Y., He Y., Tian Q., Zhao P. (2018), "*Design and Implementation of an New Embedded Image Tracking System for Micro UAV*". In: Qiao F., Patnaik S., Wang J. (eds) Recent Developments in Mechatronics and Intelligent Robotics. ICMIR 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 690. Springer, Cham
[8] Reyes Cortes F., "*Robótica, Control de robots manipuladores*", Alfaomega México 2011.
[9] Zepeda Arce G, "*Diseño e implementación de un microprocesador RISC de 32 bits en una tarjeta con FPGA y comunicación Inalámbrica*", Revista de ciencias de la ingeniería y tecnología (RECIT) vol. 1, No. 1. 2017.
[10] Vianna Raffo G. "*Modelado y control de un helicóptero quadrotor".* Universidad de Sevilla Diciembre 2007.
[11] Heba Talla M. Nabil El K. "*Dynamic Modeling and Control of a Quadrotor Using Linear and Nonlinear Approaches*", The American University in Cairo.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 18, pp. 228 - 240, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Análisis Experimental Térmico de una Plancha para Laminar Vidrio de Luz Inteligente

Mora Mora Omar[1], Mora Santos Carlos Alberto[1],
Mollinedo Ponce de León Helvio Ricardo[2] y Bedolla Hernández Jorge[1]

[1]Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Apizaco
Avenida Instituto Tecnológico S/N C.P. 90300, Apizaco, Tlaxcala
omm82@hotmail.com

[2]Instituto Politécnico Nacional - UPIITA.
Av. IPN 2580, La Laguna Ticomán, 07340 Ciudad de México, CDMX

Resumen

En el presente artículo se expone el análisis experimental térmico en que un horno para laminar vidrio de luz inteligente alcanza el calentamiento homogéneo de 120℃, en donde se realizan pruebas de calentamiento en una placa de aluminio de aleación AL 6061 en un área de 40x40cm, mediante dos diferentes tipos de resistencias eléctricas: la primera en una resistencia cilíndrica tipo Snake para plancha de sublimación de concentración térmica media de 800W/127VCA con una longitud 40x80cm en colocación de medidas geométrica adaptada a placa plana por control directo On/Off mediante sensor termostato y la segunda es una resistencia tipo plana de 1000W a 220VCA (Alta concentración controlada) fabricada para tener el mayor contacto con la placa de aluminio auxiliada mediante transferencia térmica de silicona al 94% con control de temperatura por microcontrolador, en donde se obtiene un calentamiento homogéneo a 120℃ a partir de un arranque tipo rampa ascendente con lapsos de tiempo de calentamiento controlados por un por un sistema de control autómata.

Palabras clave: Calentamiento por arranque tipo rampa ascendente, análisis térmico experimental.

1. Introducción

El vidrio laminado incorpora capas intercaladas de materiales plásticos como él *Butiral de Polivinilo* (PVB), Cuando el cristal es laminado recibe el nombre de vidrio de seguridad. Estas láminas son del tipo transparentes y suelen incluir materiales que dan un alto impacto de diseño como lo será incluir elementos como diodos (*Light Emitting Diode)* LED del tipo *(Surface-Mount-Device)* SMD y así recibir el nombre de vidrio de luz inteligente Figura 1.

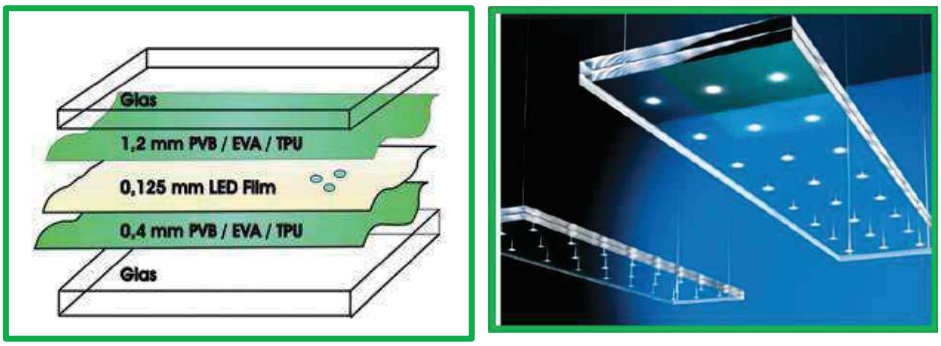


Figura 1. Especificación Típica de Vidrio Laminado con Película con Led Integrados

Existen dos procedimientos de laminado el primero es el *procedimiento por laminación* en el que el intercalario es una película sólida que se coloca entre las hojas del vidrio y se somete a un calentamiento y a una presión para obtener el producto acabado y el segundo es *laminación por fundición* en el que el intercalario se obtiene vertiendo un líquido entre las hojas de vidrio, que posteriormente es químicamente curado para obtener el producto final.

Existen hornos en el mercado que realizan este fin común, pero estos suelen ser de un costo muy elevado y trabajan bajo el principio de autoclave al vacío que generan una presión de 12 a 14 kg/cm^2 está al contraerse generan paredes irregulares lo que conlleva a realizar un mal laminado por aglomerados de adherencia.

En esta investigación se trabaja con el primer procedimiento de laminado en donde las láminas de PVB son compatibles a la fusión con las láminas de LED SMD y su adherencia con el cristal es a una temperatura no mayor a 120°C, resultado obtenido de un calentamiento homogéneo en la plancha térmica del horno, en donde se realiza un análisis experimental térmico para determinar el calentamiento homogéneo a 120℃ a partir de un arranque tipo rampa ascendente con lapsos de tiempo de calentamiento controlados por un por un sistema de control autómata**[5].**

2. Metodología Experimental

El proceso que conlleva el diseño de un horno para laminar vidrio de luz inteligente requiere del análisis en el que la plancha térmica alcanza una temperatura homogénea de 120℃ .

En el desarrollo de ingeniería de diseño se propone recubrir el plato térmico con caucho de silicona de 2.5*mm* de espesor con una conductividad térmica de 1.3 *W/m°K,* de tal manera que al ser aplicada la presión, la almohadilla empalme lo más uniformemente con el cristal. Demostrando que el calor no llega de manera inmediata al vidrio plano y evitar el contacto directo aluminio- cristal, en donde se determina que la compresión máxima se presenta en el vidrio de 9mm de espesor, siendo de 0.81*mm* su compresión máxima al ejercer una presión constante con el vidrio, determinando el % ideal de estiramiento teórico/practico que sirve para garantizar una trasferencia térmica homogénea entre la plancha térmica y el vidrio. Se calcula la cantidad de energía necesaria para realizar el cambio de temperatura en las masas de ambos materiales mediante el uso de la ecuación de la primera ley de la termodinámica de un sistema cerrado cuando el trabajo realizado es igual a cero, ecuación 1.

$$Q = mC_e\Delta T \tag{1}$$

En donde la ecuación describe la energía interna que debe acumular un cuerpo de masa *m*, con un calor especifico *Ce*, para lograr un cambio de temperatura ΔT. Considerando una temperatura

ambiente promedio de 24°C, el cambio de temperatura es de 120°C. La energía debe ser suministrada en una cierta cantidad de tiempo, para poder determinar el tiempo en el que la plancha térmica alcanza su temperatura de trabajo esto determinado de obtener la cantidad de energía total de la plancha más el caucho de silicona Pad, ecuación 2.

$$Q_{plancha}=mC_e\,\Delta T \quad + \quad Q_{pad}=mC_e\,\Delta T = \ Q_{total} \qquad (2)$$

En la metodología experimental se realizan pruebas de calentamiento en una placa de aluminio de aleación AL 6061 en un área de 40x40cm, mediante dos diferentes tipos de resistencias eléctricas: la primera en una resistencia cilíndrica tipo Snake para plancha de sublimación de concentración térmica media de 800W/127VCA con una longitud 40x80cm en colocación de medidas geométrica adaptada a placa plana por control directo On/Off mediante sensor termostato y la segunda es una resistencia tipo plana de 1000W a 220VCA (Alta concentración controlada) fabricada para tener el mayor contacto con la placa de aluminio auxiliada mediante transferencia térmica de silicona al 94%, control de temperatura por microcontrolador en donde se obtiene los siguiente:

-Experimento uno no existe calentamiento homogéneo a 120°C, debido a el tipo de resistencia siendo esta de tipo cilíndrico tipo Snake, así como al control eléctrico gobernado por arranque a tensión plena y en donde el control On/Off está a cargo por un termostato.

-Experimento dos sin calentamiento uniforme de temperatura se debe principalmente al control eléctrico de la resistencia eléctrica plana, ya que esta se calienta demasiado rápido, pero la propagación de la temperatura es muy lenta y por lo tanto el termopar tipo J (sensor) tardara en realizar el control On/Off de la resistencia, provocando que en el área de contacto de la resistencia-plancha térmica este se encuentre en una temperatura mucho mayor a la esperada en toda la placa.

-Experimento tres se determina que la temperatura es homogénea a 120°C en toda la plancha térmica debido a el control eléctrico de la resistencia eléctrica plana, ya que al ser programada por lapsos de tiempo se logra un calentamiento tipo rampa ascendente **[2].**

2.1 Pruebas de calentamiento en la plancha térmica

Consiste en realizar pruebas de calentamiento en una placa de aluminio de aleación AL 6061 en un área de 40x40cm, mediante dos diferentes tipos de resistencias eléctricas: la primera en una resistencia cilíndrica tipo snake para plancha de sublimación de concentración térmica media de 800W/127VCA con una longitud 40x80cm en colocación de medidas geométrica adaptada a placa plana por control directo On/Off mediante sensor termostato y la segunda es una resistencia tipo plana de 1000W a 220VCA (Alta concentración controlada) fabricada para tener el mayor contacto con la placa de aluminio auxiliada mediante transferencia de silicona al 94%, control de temperatura por microcontrolador**[1].**

Prueba de calentamiento 1

Se realizaron las siguientes modificaciones y adaptaciones a la plancha térmica figura 2:

1. Fabricación y adaptación de la plancha térmica (placa de aluminio AL6061) geometría propuesta plana, espesor de placa 4mm.
2. Resistencia cilíndrica en tipo snake para plancha de sublimación de concentración térmica media de 800 W./127VCA
3. Controlador de temperatura mediante termostato ubicado en el punto central de la placa de aluminio, así mismo controla el On/Off a tensión plena.
4.Sin modificación de transferencia térmica entre la resistencia y la placa de aluminio.
5. Experimento realizado en un cuarto cerrado sin corrientes de viento.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 18, pp. 228 - 240, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Figura 2. Modificación de la resistencia y el termostato de la plancha térmica

Sobre esta primera versión se realizaron pruebas calentamiento con arranque de resistencia a tensión plena figura 3, con el fin de evaluar el calentamiento uniforme en la plancha térmica. Se diseño un paro y arranque de resistencia controlado por el sensor de temperatura On/Off además el termostato estará calibrado a 120°C, con auxiliar de relevador de estado sólido para el arranque solo como pase de fase.

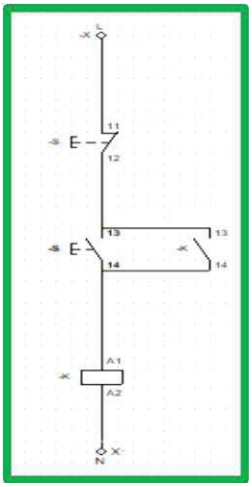


Figura 3. Control a tensión plena (DIN), para el calentamiento de la resistencia eléctrica

A continuación, se describe el método utilizado para la toma muestral de temperaturas en la plancha para poder evaluar la distribución uniforme en la misma.

1. Se cuadricula la placa con una distribución de 72 muestras de 5x5cm C/U, en el cual el eje X=8 y el eje Y=9, figura 4.

Figura 4. Trazo de cuadrantes en la plancha térmica AL6061

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 18, pp. 228 - 240, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

2. Se coloca el presostato en el centro de la placa previamente calibrado a 120°C para controlar la temperatura On/Off.
3. Se calienta la plancha a 120°C (temperatura máxima) la cual es controlada por el termostato (Aun sin determinar la homogeneidad de la placa).
4. Se toma el tiempo en el que la plancha alcanza 120°C la cual es controlada únicamente por el Off de la resistencia.
5. Se recaban la temperatura de cada uno de los cuadrantes tabla 1, mediante un multímetro marca Fluke (AMPROBE AM-570) con toma de muestra por contacto: sensor de temperatura con termopar tipo J – placa de aluminio Al 6061, registrando los valores obtenidos tabla de la derecha.

Tabla 1. Valores obtenidos de la medición de temperaturas en la plancha térmica

Cuadrantes X/Y	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	118	117	117	119	117	119	117	119	118
B	119	120	120	122	117	120	119	118	117
C	119	120	122	120	120	124	124	122	116
D	118	120	121	120	122	122	122	123	118
F	116	122	122	119	122	123	123	122	119
G	117	121	123	122	121	122	122	124	118
H	117	123	118	121	123	121	120	122	117
I	117	117	119	118	119	117	119	118	118

Los resultados son poco favorables. Se analizan los resultados de medición obtenidos y se determina que la propagación de la temperatura en la plancha térmica no es uniforme esto determinado por lo siguiente:

1. La temperatura no es uniforme, determinado por la variación de lecturas en los diferentes puntos del plano de temperatura.
2. El tiempo de calentamiento es muy rápido 7-10min (partiendo de la temperatura ambiente 24°C) y al no ser controlado la temperatura es abrupta.
3. La resistencia cilíndrica tiene características de calentamiento de alta concentración térmica esto derivado del tipo de arranque de calentamiento.
4. La ubicación de sensor termostato no es adecuada. Se ubica muy cerca de la resistencia y el sensor transduce muy rápido la temperatura de 120°C.
5. El intercambio de temperatura es demasiado rápido solo en los puntos donde existe mayor contacto entre la resistencia y la placa de aluminio.

La falla de calentamiento uniforme de temperatura se debe principalmente a el tipo de resistencia seleccionada, así como al control eléctrico de la misma y por la ubicación del sensor de temperatura tal y como se sustenta con la gráfica de distribución de temperatura figura 5, en donde se observa que en los puntos donde no hay contacto resistencia-AL6061 la temperatura es más fría, esto derivado de los puntos muestrales más alejados de la placa, en los puntos más obscuros en donde existe mayor contacto entre la resistencia eléctrica y la placa de aluminio AL6061.

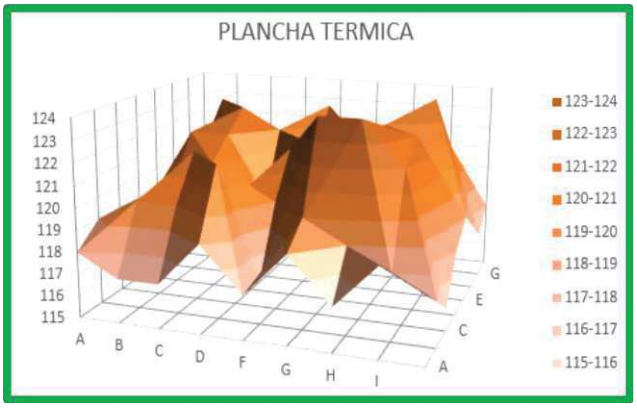


Figura 5. Grafica del comportamiento no homogéneo de la temperatura en la plancha térmica

Prueba de calentamiento 2

Se realizaron las siguientes modificaciones y adaptaciones a la plancha térmica figura 6:

1. Fabricación y adaptación de la plancha térmica (placa de aluminio AL6061) geometría propuesta plana, espesor de placa 4mm.
2. Resistencia tipo plana de 100W a 220VCA (Alta concentración controlada) fabricada para tener el mayor contacto con la placa de aluminio auxiliada mediante transferencia de silicona al 94%.
3. Reutilización de termopar tipo J con terminal de ojillo para adaptarla en el punto más lejano de la placa para determinar la propagación térmica obtenida del calentamiento de las resistencias.
4. Modificación de transferencia térmica entre la resistencia y la placa de aluminio AL 6061, mediante una pasta de trasferencia térmica HEATSINK PLASTER al 94%
5. Controlador Honeywell DC 1010 para controlar el encendido On/Off de la resistencia, auxiliada a salida a relevador de estado sólido.
6. Experimento realizado en un cuarto cerrado sin corrientes de viento.

Figura 6. Modificación de la resistencia eléctrica de la plancha térmica

Sobre esta segunda versión se realizaron pruebas calentamiento con arranque de resistencia a tensión plena figura 7, con el fin de evaluar el calentamiento uniforme en la plancha térmica. Se diseño un paro y arranque de resistencia controlado por el controlador Honeywell DC 1010 programado a 120°C, con auxiliar de relevador de estado sólido para el arranque solo como pase de fase.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 18, pp. 228 - 240, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

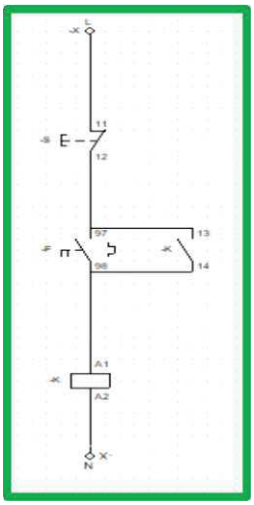


Figura 7. Control a tensión plena mediante el controlador Honeywell DC 1010 (DIN), para el calentamiento de la resistencia eléctrica

A continuación, se describe el método utilizado para la toma muestral de temperaturas en la plancha para poder evaluar la distribución uniforme en la misma.

1.Se cuadricula la placa con una distribución de 72 muestras de 5x5cm C/U, en el cual el eje X=8 y el eje Y=9, figura de la izquierda figura 8.

Figura 8. Trazo de cuadrantes en la plancha térmica AL6061

2. Se coloca el termopar tipo J con terminal de ojillo para adaptarla en el punto más lejano de la placa para determinar la propagación térmica obtenida del calentamiento de las resistencias.
3. Se calienta la plancha a 120°C (temperatura máxima) la cual es controlada por el controlador Honeywell DC 1010 (Aun sin determinar la homogeneidad de la placa).
4. Se toma el tiempo en el que la plancha alcanza 120°C la cual es controlada únicamente por el On/Off del controlador Honeywell DC 1010.
5. Se recaban la temperatura de cada uno de los cuadrantes tabla 2, mediante un multímetro marca Fluke (AMPROBE AM-570) con toma de muestra por contacto: sensor de temperatura con termopar tipo J – placa de aluminio Al 6061, registrando los valores obtenidos tabla de la derecha.

Tabla 2. Valores obtenidos de la medición de temperaturas en la plancha térmica

Cuadrantes X/Y	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	119	119	120	120	120	118	118	119	120
B	119	120	120	120	120	120	120	120	120
C	119	223	223	223	120	223	223	222	120
D	120	221	221	223	120	221	222	223	120
F	120	226	222	222	119	223	221	221	120
G	120	223	224	221	118	221	222	222	119
H	120	120	120	120	120	120	120	120	120
I	119	120	119	120	119	120	119	120	120

Los resultados son poco favorables. Se analizan los resultados de medición obtenidos y se determina que la propagación de la temperatura en la plancha térmica no es uniforme esto determinado por lo siguiente:

1. La temperatura no es uniforme, determinado por la variación de lecturas en los diferentes puntos del plano de temperatura.
2. El tiempo de calentamiento es muy lento 20min (partiendo de la temperatura ambiente 24°C).
3. La resistencia plana al tener contacto directo con la placa la concentración térmica es muy alta únicamente en el área de la resistencia ya que el arranque sigue siendo a tensión plena.
4. La ubicación del termopar es adecuada, porque la lectura de temperatura siempre se registra en el punto más lejano de la plancha térmica, pero el sensor transduce muy lento la temperatura de 120°C.
5. El intercambio de temperatura es demasiado rápido solo en los puntos donde existe mayor contacto entre la resistencia y la placa de aluminio, provocando que en los puntos más lejanos la temperatura se propague más lentamente y esto ocasiona que no sea uniforme en la placa.

La falla de calentamiento uniforme de temperatura figura9, se debe principalmente al control eléctrico de la resistencia eléctrica plana, ya que esta se calienta demasiado rápido pero la propagación de la temperatura es muy lenta y por lo tanto el termopar tipo J (sensor) tardara en realizar el control On/Off de la resistencia, provocando que en el área de contacto de la resistencia-plancha térmica este se encuentre en una temperatura mucho mayor a la esperada en toda la placa, tal y como se muestra en la siguiente imagen, en los puntos más obscuros en donde existe mayor contacto entre la resistencia eléctrica y el plato térmico es mayor la temperatura a diferencia de los puntos más claros en donde se alcanzan 120°C pero la temperatura no es uniforme.

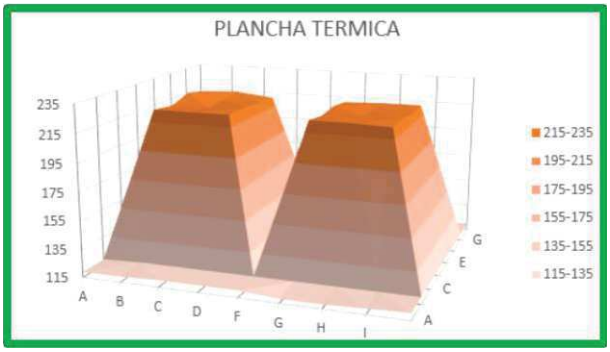


Figura 9. Grafica del comportamiento no homogéneo de la temperatura en la plancha térmica

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 18, pp. 228 - 240, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Prueba de calentamiento 3

Se realizaron las siguientes modificaciones y adaptaciones a la plancha térmica figura 10:

1. Fabricación y adaptación de la nueva plancha térmica (placa de aluminio AL6061) geometría propuesta plana, espesor de placa 4mm.
2. Resistencia tipo plana de 1000W a 220VCA (Alta concentración controlada) fabricada para tener el mayor contacto con la placa de aluminio auxiliada mediante transferencia de silicona al 94%.
3. Reutilización de termopar tipo J con terminal de ojillo para adaptarla en el punto más lejano de la placa para determinar la propagación térmica obtenida del calentamiento de las resistencias.
4. Modificación de transferencia térmica entre la resistencia y la placa de aluminio AL 6061, mediante una pasta de trasferencia térmica HEATSINK PLASTER al 94%
5. Controlador Honeywell DC 1010 para controlar el encendido On/Off de la resistencia.
6. Temporizador CROUZET MLR1, para montaje en riel DIN,Vi=12-220VCA, control de dos tiempos por lapsos On/Off programados, auxiliada a salida a relevador de estado sólido. sin alteración del pulso obtenido del controlador de temperatura.
7. Experimento realizado en un cuarto cerrado sin corrientes de viento.

Figura 10. Modificación de la plancha térmica anexando pasta de trasferencia térmica entre la resistencia eléctrica y la plancha térmica AL6061

Sobre esta tercera versión se realizaron pruebas calentamiento con arranque de resistencia a tensión controlada, con el fin de evaluar el calentamiento uniforme en la plancha térmica. Se diseño un paro y arranque de resistencia Manual/Automático figura 11, controlado por el controlador Honeywell DC 1010 programado a 120°C y el temporizador (-k) el cual estará programado dos tiempos uno On y otro Off, para lograr un arranque tipo rampa ascendente de temperatura, el cual accionará un relevador de estado sólido (-KA) para el arranque solo como pase de fase **[4]**.

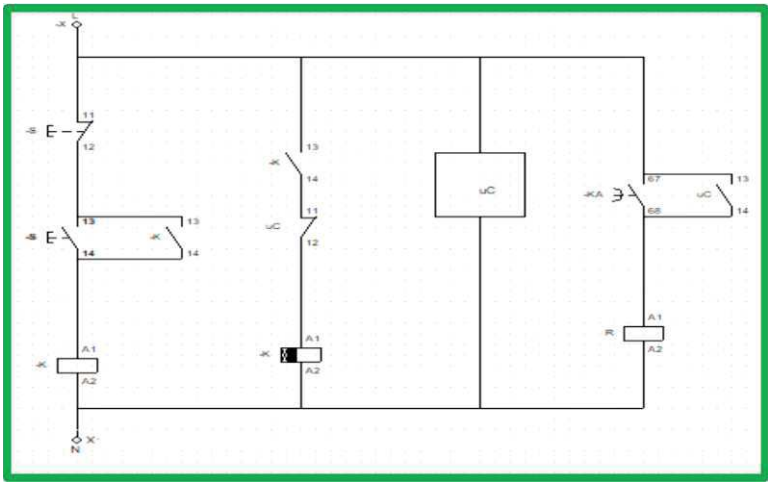


Figura 11. Control de calentamiento Manual/Automático (DIN), mediante el temporizador de dos tiempos y el microcontrolador de temperatura DC1010

A continuación, se describe el método utilizado para la toma muestral de temperaturas en la placa para poder evaluar la distribución uniforme en la misma.

1. Se cuadricula la placa con una distribución de 72 muestras de 5x5cm C/U, en el cual el eje X=8 y el eje Y=9, figura de la izquierda figura 12.

Figura 12. Trazo de cuadrantes en la plancha térmica AL6061

2. Se coloca el termopar tipo J con terminal de ojillo para adaptarla en el punto más lejano de la plancha para determinar la propagación térmica obtenida del calentamiento de las resistencias.
3. Se calienta la plancha a 120°C (temperatura máxima) la cual es controlada por el controlador Honeywell DC 1010 y el Temporizador de dos tiempos (Aun sin determinar la homogeneidad de la plancha).
4. Se toma el tiempo en el que la plancha alcanza 120°C la cual es controlada únicamente por el On/Off del controlador Honeywell DC 1010.
5. Se recaban la temperatura de cada uno de los cuadrantes tabla 3, mediante un multímetro marca Fluke (AMPROBE AM-570) con toma de muestra por contacto: sensor de temperatura con termopar tipo J – placa de aluminio Al 6061, registrando los valores obtenidos tabla de la derecha.

Tabla 3. Valores obtenidos de la medición de temperaturas en la plancha térmica

Cuadrantes X/Y	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	119	120	120	119	119	120	120	120	120
B	119	120	120	120	120	120	120	120	120
C	119	120	120	120	120	120	120	120	120
D	120	120	120	120	120	120	120	120	120
F	120	120	120	120	120	120	120	120	120
G	120	120	120	120	120	120	120	120	119
H	120	120	120	120	120	120	120	120	120
I	119	120	119	120	119	120	119	120	120

Los resultados son muy favorables. Se analizan los resultados de medición obtenidos y se determina que la propagación de la temperatura en la plancha térmico es uniforme esto determinado por lo siguiente:

1. La temperatura es uniforme, determinado por que solo existe una variación de lecturas de 1°C y solo en puntos más alejados del plano de temperatura.

2. El tiempo de calentamiento optimo es de 30min (partiendo de la temperatura ambiente 24°C), se determina que sea más lento a comparación de las 2 pruebas anteriores, para que la propagación de la temperatura sea más homogénea.
3. La resistencia plana al tener un calentamiento por intervalos de tiempo propagara la temperatura homogéneamente a la plancha térmica.
4. La ubicación del termopar es adecuada, porque la lectura de temperatura siempre se registra en el punto más lejano de la plancha térmica.

La homogeneidad uniforme de temperatura figura 13, se debe principalmente al control eléctrico de la resistencia eléctrica plana, ya que al ser programada por lapsos de tiempo se logra un calentamiento tipo rampa ascendente tal y como se muestra en las gráficas siguientes los puntos más obscuros muestra la propagación de la temperatura más homogénea mientras que se denota que existen puntos claros, pero estos ya son mínimos, determinando así que la temperatura es homogénea **[5].**

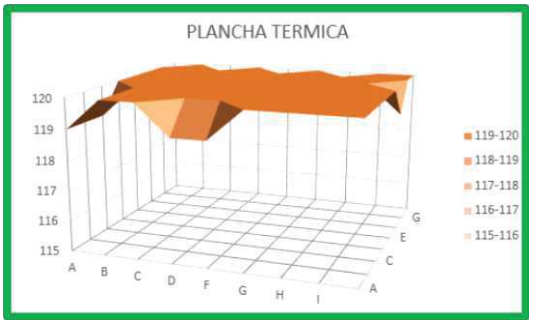


Figura 13. Grafica del comportamiento homogéneo de la temperatura en la plancha térmica

3. Resultados

Del análisis experimental térmico de la plancha térmica de un horno para laminar vidrio de luz inteligente se obtiene un calentamiento homogéneo a 120℃ a partir de un arranque tipo rampa ascendente con lapsos de tiempo de calentamiento controlados por un por un sistema de control autómata definiendo el comportamiento deseado creado a partir de la descripción del proceso de operación figura 14.

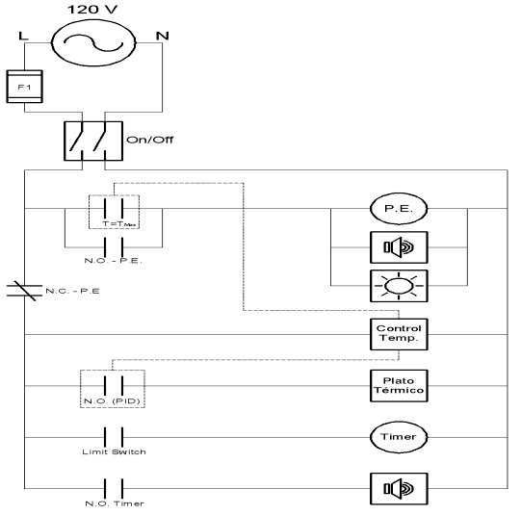
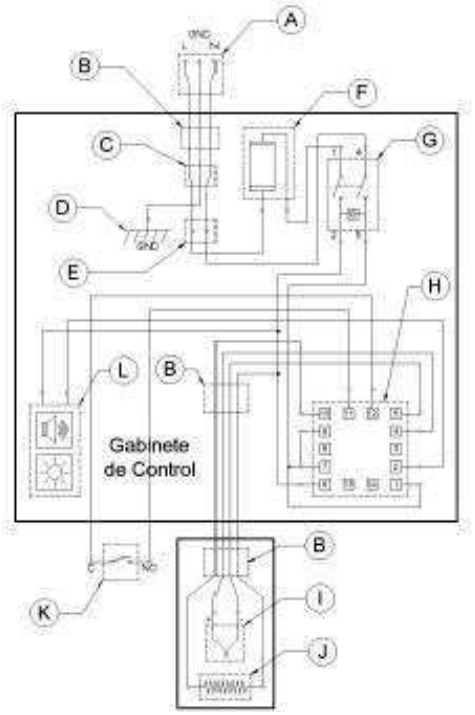


Figura 14. Funcionamiento de control de la plancha térmica

Se obtiene el modelo estructural que conformara el tablero de control de la plancha térmica figura 15, englobando el análisis derivado de la metodología experimental.



-A Cable de alimentación, terminal NEMA 5-15 contactos controlados por el temporizador de arranque ascendente.
-B Glándula M16
-C Abrazadera de ¼" para cable de alimentación
-D Contacto para tierra en chasis
-E Clema 2 contactos
-F Porta fusible y fusible de 30ª a 120VCA.
-G Switch On/Off con luz piloto
-H Controlador DC1010
-I Termopar tipo J
-J Resistencia tipo plana 150x150mm a 500W-200V
-K Limit Switch N/O
-L Buzzer

Figura 15. Diagrama de conexión del tablero del control de la plancha térmica

Se obtienen los materiales que englobaran a un bloque de la plancha térmica Figura 16, resultado obtenido del análisis experimental térmico, para lograr un calentamiento homogéneo a 120℃, en el área de transferencia térmica de la placa de aluminio AL6061 y el área de trasferencia térmica en el caucho de silicona tipo espuma Pad, mediante el calentamiento de la resistencia eléctrica AISI 316L de acero inoxidable **[3].**

Figura 16. Materiales que engloban a un bloque de la plancha térmica

Se obtiene el modelo CAD para evaluar la distribución de la temperatura y su efecto en la integridad estructural de una plancha térmica de un horno para lamiado de vidrio de luz inteligente atreves del software de ANSYS a efectuarse en la siguiente etapa de la investigación figura 17.

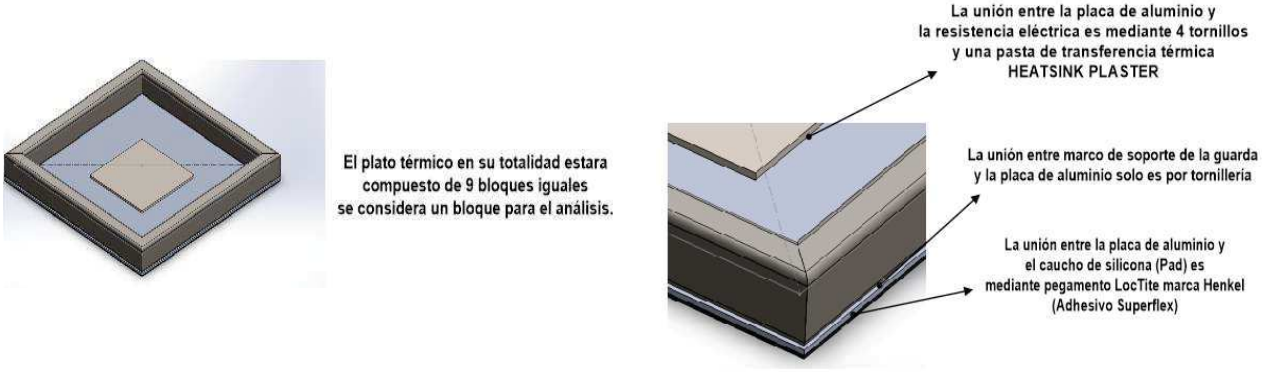


Figura 17. Modelo CAD de un bloque de la plancha térmica

4. Conclusión

Del análisis experimental térmico (prueba experimental 3) de la plancha térmica de un horno para laminar vidrio de luz inteligente se obtiene la homogeneidad de 120℃ constante en el tiempo, que es requerida para laminar vidrio derivado del calentamiento tipo rampa ascendente por intervalos de tiempo controlados por un microcontrolador, así como los materiales que faciliten la trasferencia térmica homogénea y por último la obtención de un bloque del modelo CAD de la plancha térmica para efectuar el análisis térmico-estructural mediante ANSYS a efectuarse en la siguiente etapa de investigación.

Referencias

[1] Federico A., "Método experimental Inicial en Investigación" ,2008, ISBN 9789681683016.

[2] P ORLOV., "Ingeniería de Diseño" MIR ISBN 2910008743251.

[3] Ciencia y Técnica., "La importancia del método para la selección de materiales", Mayo 2004, UTP. ISSN 0122-1701.

[4] Ogata., "Ingeniería de control moderna", Pearson, 2010.

[5] F. Pelayo∗, M.J. Lamela-Rey, M. Muniz-Calvente, M. López-Aenlle, A. Álvarez-Vázquez, A. Fernández., "Study of the time-temperature-dependent behaviour of PVB: Application to laminated glass elementsi, Department of Construction and Manufacturing Engineering", University of Oviedo, Campus de Viesques, 33203 Gijón, Spain.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 241 - 253, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Generación de Trayectorias para Robot Móvil Mediante una Variación del Método RRT

Salas Medina Raúl Alfredo, García Luna Francesco José y Luviano Cruz David

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
Departamento de ingeniería Industrial y Manufactura, Ingeniería Mecatrónica
al137613@alumnos.uacj.mx

Resumen

Es bien sabido que en la época actual el avance de la robótica móvil ha sido a pasos agigantados, se han logrado desarrollar vehículos autónomos con la capacidad de realizar el traslado de pasajeros de un punto a otro sin la necesidad de un conductor al volante, robot móviles han sido aplicados en líneas de producción para el cuidado y mantenimiento de éstas, robots manipuladores aunados a robots móviles han sido utilizados en almacenes para el manejo y traslado de materiales , lo cual implica un gran campo de aplicaciones posibles para esta tecnología

El presente trabajo plantea la programación de un algoritmo, el cual tendrá la tarea de generar trayectorias entre dos puntos, es decir. Para la generación de las trayectorias se utilizará una variante del método "Rapidly-Exploring Random Trees", a diferencia de este algoritmo, el nuestro genera una sola ramificación en dirección al objetivo y al momento de que un punto generado se encuentre en colisión con un objeto se creará un paso de manera aleatorio para evitar encontrarse nuevamente con el obstáculo. El proceso se realiza hasta llegar al punto objetivo. Después de haber generado la ruta principal, se buscan los puntos mínimos necesarios que de igual manera permitan llegar al objetivo. Finalmente, obtenidos los puntos se ajustan los puntos mediante un spline.

Palabras clave: Generación de trayectorias, robots móviles, RRT.

1. Introducción

Durante el constante avance de la tecnología ha habido grandes cambios en las últimas décadas con respecto al ramo de la robótica, en un pasado se contaba con una cantidad limitada de robots que desempeñaban tareas para optimizar procesos industriales por su precisión, fuerza y velocidad, robots fijos con restricciones de distancia y movimiento [1], pero conforme el tiempo avanza, las innovaciones se han hecho presentes tanto que pueden verse en la creación de robot móviles que se pueden manejarse en dos y tres dimensiones.

Una de las mayores razones para la implementación de robot móviles en diversas áreas, recae en lo que una persona no puede realizar o a donde no puede llegar. Robots móviles han sido utilizados en exploraciones en lugares donde la participación de seres humanos supone un riesgo para su salud, un ejemplo claro son los robots utilizados para la exploración de la planta nuclear de Chernóbil.

Tres aspectos cinemáticos que se deben tomar en cuenta al diseñar un robot son: la movilidad, el control y el posicionamiento. Donde el primero determina cómo será el movimiento del robot para intentar arribar al objetivo, el segundo lidia con las variables cinemáticas, como velocidades, para controlar el movimiento y el tercero es para la localización actual del robot en el área de trabajo, la cual es un aspecto fundamental de la navegación móvil de los robots [2].

Ingredientes básicos para la planeación de trayectorias, según LaValle [3], son el estado, el tiempo, acciones, estado inicial y final, un criterio, si es importante la eficiencia de llegar de un punto a otro y finalmente un plan, el cual determinará que se hará en las tomas de decisiones.

La navegación parte importante de la robótica merece su estudio por separado, ya que, gracias a esta, la interacción con el entorno es posible. Robin R. Murphy [4], en su libro "*Introduction to AI robotics"*, hace mención de cuatros preguntas que son indispensables para la navegación de robots móviles, ¿a dónde voy?, ¿cuál es la mejor manera de hacerlo?, ¿dónde he estado?, ¿dónde estoy?, haciendo alusión que él está en el papel del robot, el cual no tiene una capacidad para recordar, ni para pensar por sí mismo.

La planificación de la ruta del robot es un aspecto importante del diseño del comportamiento de control de navegación. El robot debe alcanzar la configuración final / objetivo con un tiempo mínimo y, al mismo tiempo, la distancia debe ser mínima. Los otros criterios son una menor complejidad computacional y un menor consumo de energía, que solo pueden ser posibles cuando el robot se mueva en la ruta más corta desde la configuración de inicio hasta la configuración del objetivo.

Es un hecho que la demanda de aplicación de robots móviles para realizar actividades que son tardadas y cansadas va en aumento debido a la falta de mano de obra humana. La tarea realizada por humanos dentro de un almacén ha sido repetitiva y exhaustiva. Por ello la implementación de robots autónomos dentro de este ambiente para recoger y colocar objetos en puntos específicos en el almacén supone un ahorro de tiempo y dinero para este tipo de negocios. El método para la evasión de obstáculos propuesta [5] considera que los obstáculos, en este caso los estantes, son estáticos, se cuenta con un robot móvil y espacio libre. Posteriormente creará los caminos evaluando si hay objetos a más de un metro de distancia, sino es así continuará para llegar al punto en donde tomará o dejará el objeto en el estante.

Rapidly-Exploring Random Trees [6], es un algoritmo probabilístico usado para exploración rápida de áreas y planificación de caminos en espacios. El espacio puede ser con obstáculos o sin obstáculos. El algoritmo tiene la posibilidad de trabajar en dos o más dimensiones y para robots holonómicos o no-holonómicos. A pesar de las buenas características, este método tiene dos deficiencias. No es óptimo porque depende de probabilidad y un crecimiento aleatorio en el espacio, además del número de puntos redundantes que se utilizan para explorar la ruta desde el origen hasta el destino es grande.

Planificadores de caminos basado en árboles han sido mostrados como una buena solución para problemas que se presentan al planificar una trayectoria. Estos algoritmos analizan el problema de encontrar una secuencia factible de movimientos de un robot para maniobrar entre obstáculos desde un punto inicial hasta el punto objetivo.

Se han propuesto algoritmos que generan nodos en áreas difíciles, llamados pasajes estrechos. Estos métodos funcionan bien cuando el área de trabajo es similar a la configuración del espacio. Algunos planificadores usan la información conocida del área de trabajo para ayudar a la configuración de muestreo, estos métodos son llamados planificadores que usan indicaciones del espacio de trabajo. En el método propuesto en *"An Obstacle-based RRT"* [7], se usa un vector que delimita los bordes de los obstáculos para facilitar la dirección en la que debe crecer el árbol del método RRT. Además, que la implementación de este ayudará a una mejor generación de puntos en pasajes estrechos.

El movimiento basado en muestreo se ha convertido en un poderoso marco de referencia para la solución de tareas de movimiento para robots. También se ha vuelto casi esencial con el paso del tiempo la planeación de trayectorias de manera efectiva en ambientes dinámicos complejos. La planificación de movimiento apunta a encontrar una secuencia de configuraciones en el robot para llevarlo del estado inicial hasta el estado final u objetivo, con ciertas restricciones del ambiente y la dinámica interna del robot mismo. El algoritmo RRT básico hace crecer un árbol de trayectorias factibles arraigadas en el estado inicial de manera incremental y devuelve una solución cuando una de las trayectorias libres de colisión alcanza el punto objetivo [8].

2. Metodología

Para la realización de esta implementación se llevó una metodología en el siguiente orden: elección de método a utilizar, generación de pseudocódigo, programación de algoritmo, simulación de algoritmo, validación de programación.

2.1 Elección de algoritmo

Para la elección del algoritmo se hizo una investigación de una variedad de algoritmos de planeación de trayectorias, algoritmos como A*, Dijkstra, Potential Field, RRT, entre otros, los cuales tiene en común el objetivo de encontrar la trayectoria la cual lleve desde un punto inicial hasta un punto final. Distintos algoritmos de planeación lo hacen de manera aleatoria, otros de manera incremental u otros seccionan el área de trabajo en partes iguales, pero de igual manera que todos logran el objetivo, pero con distintos procedimientos.

A* es un algoritmo compacto y eficiente [9]. A* es un algoritmo típico de inteligencia artificial de búsqueda heurística. Comparado contra otros métodos de inteligencia artificial, tiene algunas ventajas, como un tiempo de ejecución más corto, alta eficiencia, fácil implementación.

El algoritmo Dijkstra, también llamado algoritmo de caminos mínimos, es un algoritmo que se encarga de encontrar el camino más corto entre dos puntos. La idea de este método es conocer todos los caminos y conociendo el costo de cada uno elegir el óptimo [1].

Potential Field [10] es un método inspirado en las cargas eléctricas de los objetos. Se puede observar al robot como una partícula con carga positiva y a su vez los obstáculos tendrían el mismo tipo carga con intensión de que se repelasen entre ellos y evitar colisiones entre robot y objetos. Por su parte el punto final debe de ser de carga distinta al del robot creando una atracción entre estos.

Rapidly-Exploring Random Trees, el método elegido como base para elaboración de este proyecto, es un algoritmo probabilístico que genera de ramificaciones de manera aleatoria partiendo de un nodo inicial, estas ramificaciones crecen en toda el área de trabajo y se detienen al llegar al objetivo. Este algoritmo tiene la habilidad de trabajar en dos o más dimensiones y puede ser implementada en robots holonómicos o no holonómicos [8].

Tabla 1. Comparación de métodos

Método	Ventajas	Desventajas
A*	Rápido con buena heurística	Los caminos tienden a estar cerca de los obstáculos
Dijkstra	Camino más corto óptimo	Lento, no hay garantía de separación entre camino y obstáculos
RRT	Rápido	No encuentra el camino más corto, no hay garantía de tener una separación entre los obstáculos y la trayectoria
Potential Field	Se garantiza separación entre obstáculos y la trayectoria	Mal desempeño en pasajes estrechos

2.2 Funciones de programación

Para el desarrollo de este programa de manera eficiente y estructurada, se separó en funciones para agilizar la ejecución debido que al ser un programa iterativo demanda bastantes recursos computacionales

2.2.1 Generación de obstáculos

Esta función está encargada de generar obstáculos de manera aleatoria dentro del área de trabajo.

entrada: mapa, n, alto, ancho
salida : w, h
$n \leftarrow$ cantidad obstaculos
for *i* **to** *n* **do**
  Centroide $w \leftarrow$ Generar un punto aleatorio en el espacio $\mathbb{R}^2$
  $w \leftarrow$ anchura del obstáculo $=$ centroide $\pm$ ancho
  $h \leftarrow$ altura del obstáculo $=$ centroide $\pm$ alto
end

Algoritmo 1: Generación obstáculo

2.2.2 Generación de punto inicial y punto final

La función para generar los puntos inicial y final puede ser utilizada de manera aleatoria o de manera fija para tener un mejor control de la ruta a generar.

Esta función cuando es elegida en manera aleatoria evalúa la colisión con los obstáculos, si se encuentra en esta situación vuelve a generar el punto en otro punto.

entrada: mapa, w, h
salida : pp
$\text{Punto}_{inicial} \leftarrow$ Generar un punto aleatorio en el espacio $\mathbb{R}^2$
while *$\text{Punto}_{inicial}$ choca con obstáculos* **do**
  $\text{Punto}_{inicial} \leftarrow$ generar un punto aleatorio en el espacio $\mathbb{R}^2$
end

Algoritmo 2: Generación Pi y Pf

2.2.3 Verificación de colisión

Esta función tiene como entrada todas las dimensiones de los obstáculos generados por una de las funciones anteriores, las dimensiones del mapa y un punto a evaluar. Se tiene la variable dentroMapa la cual considera los límites del área de trabajo y la variable dentroObs que son los límites de cada uno de los obstáculos.

La variable de salida flag es un indicador booleano que notifica si se ha cumplido la condición dentro de la función de verificación de colisión, es decir, cuando un punto se encuentra dentro del área de trabajo y a su vez dentro de los límites de algún obstáculo.

Una vez obtenidos estos parámetros se analiza si el punto está dentro del mapa y en colisión con un obstáculo, lo cual dará como respuesta un *1 booleano* para indicar que el punto en cuestión está dentro de las fronteras de algún obstáculo.

```
entrada: x, y, xObstáculo, yObstáculo, mapa
salida  : flag
n ← cantidad obstaculos
for i to n do
    dentroMapa ← Revisión de punto dentro del área de trabajo
    dentroObs ← Revisión de punto en colisión con un obstáculo
    if dentroMapa & dentroObs then
        flag = true else
        end
        flag = false
    end
end
```

Algoritmo 3: Verificación de colisión

2.2.4 Generación de ruta

Generación de ruta es la función donde recae más importancia de todo el experimento, obtenidos los puntos inicial y final, los obstáculos, el siguiente paso es generar la ruta.

La función comienza calculando la distancia entre el punto final y el punto inicial, obtenida la diferencia es necesario calcular la normal de dicho intervalo para generar pasos de magnitud uno. Si la distancia entre dichos puntos es menor a uno el paso por dar será de menor magnitud con la intensión de evitar exceder el punto objetivo.

Posteriormente se genera un nuevo punto en dirección hacia el objetivo, el cual está dado por la suma de incremento de magnitud uno y el punto anterior. Es requerido evaluar si este punto se encuentra en colisión con alguno de los obstáculos generados, de ser así se generará un paso con dirección aleatoria con la intención de evadir el obstáculo. Dicho punto aleatorio se evaluará nuevamente bajo la misma condición, una vez que el punto no se encuentra en colisión se trazará sobre el plano.

entrada: $P_{inicial}$, P_{final}, w, h, mapa, reps
salida : ruta
$reps \leftarrow$ cantidad iteraciones
$P_{nuevo} \leftarrow P_{inicial}$
$P_{anterior} \leftarrow P_{nuevo}$
$P_{auxiliar} \leftarrow P_{nuevo}$
$avance \leftarrow P_{final}$ - P_{nuevo}
$Lambda \leftarrow$ Norma de distancia entre puntos
while *iterador* $<$ *reps* **do**
  if *norma*$(avance) > 1$ **then**
    Lambda $= 1$ / norma$(avance)$
    else
      Lambda $= 1$
    end
  end
  incremento $= Lambda$ * $avance$
  $P_{Auxiliar} = P_{anterior} +$ incremento
  while $P_{Auxiliar}$ *colisione con algún obstáculo* **do**
    $P_{Auxiliar} \leftarrow$ generar punto aleatorio en $\mathbb{R}^2$
    $avance_{colisión} = P_{anterior} - P_{Auxiliar}$
    if *norma*$(avance_{colisión}) > 1$ **then**
      lambda$_2 = 1$/norma$(avance_{colisión})$
      else
        Lambda$_2 = 1$
      end
    end
    incremento$_2 = lambda_2$ * $avance_{colisión}$
    $P_{auxiliar} = P_{anterior} +$ incremento$_2$;
  end
  $P_{nuevo} = P_{anterior}$
  ruta $\leftarrow$ Almacenar puntos generados $= P_{nuevo}$
  $avance = P_{final}$ - P_{nuevo}
  $P_{nuevo} = P_{anterior} +$ incremento;
  iterador $=$ iterador $+ 1$;
end

Algoritmo 4: Generación de ruta

2.2.5 Generación de ruta de puntos mínimos

Está función tiene como entrada inicial la ruta obtenida de la función anterior. Sabiendo los puntos generados en la función ruta se realiza una evaluación para utilizar los puntos mínimos.

Se discretiza la distancia entre el punto inicial y los puntos siguientes para analizar si hay colisión durante esa distancia. Cuando haya colisión se guardará el punto anterior al donde hubo colisión, es decir, en el último punto viable y ese punto se convertirá en el punto inicial y se continuará el proceso hasta llegar al punto final.

Una vez obtenidos los puntos mínimos por medio de la función se genera una interpolación de las posiciones creando una curva que pasa por todos los puntos y sin colisión con algún obstáculo.

```
entrada: ruta, w, h, mapa
salida   : puntos
ii ← 1 : Primer elemento del arreglo ruta
jj ← 2 : Segundo elemento del arreglo ruta
slices ← cantidad de particiones
ruta ← puntos almacenados de la ruta inicial
puntos ← puntos mínimos almacenados
while jj <= longitud de ruta do
    P_inicial ← primer elemento de ruta
    P_posible ← segundo elemento de ruta
    distancia = P_inicial - P_posible
    for k = 1 to Slices do
        lambda = k/slices;
        incre = lambda * dist
        pAux = Pini + incre
        P_auxiliar = P_inicial + incremento;
        if P_Auxiliar colisiona con algún obstáculo then
            ii = jj-1
            puntos ← guardar elemento actual de ruta
            break
        end
        if k == slices then
            jj = jj+1
            break
        end
    end
end
puntos ← guardar último elemento de ruta
```

Algoritmo 5: Generación de ruta de puntos mínimos

El siguiente diagrama de flujo describe de manera gráfica el proceso por el cual este sistema genera una trayectoria.

Primero se genera el área de trabajo, se generan los límites del mapa y los obstáculos aleatorios. Seguido de esto se genera el punto inicial y final, los cuales son evaluados para conocer si se encuentran en colisión con algún objeto generado, si la condición es verdadera se generan nuevamente los puntos.

Posteriormente se generarán los pasos en dirección al objetivo mientras el iterador sea menor a la variable reps. Cada paso será evaluado bajo la función de colisión, de ser así se generará un punto aleatorio.

Así mismo una vez terminada la ruta inicial se ejecutará la función de puntos mínimos, tal que se guardará otra ruta que tomará solo los puntos necesarios de la ruta inicial, minimizando la cantidad de posiciones guardada.

Finalmente tomando los puntos mínimos se realiza una interpolación de dichos puntos para trazar una trayectoria curva más agradable para la aplicación en un robot.

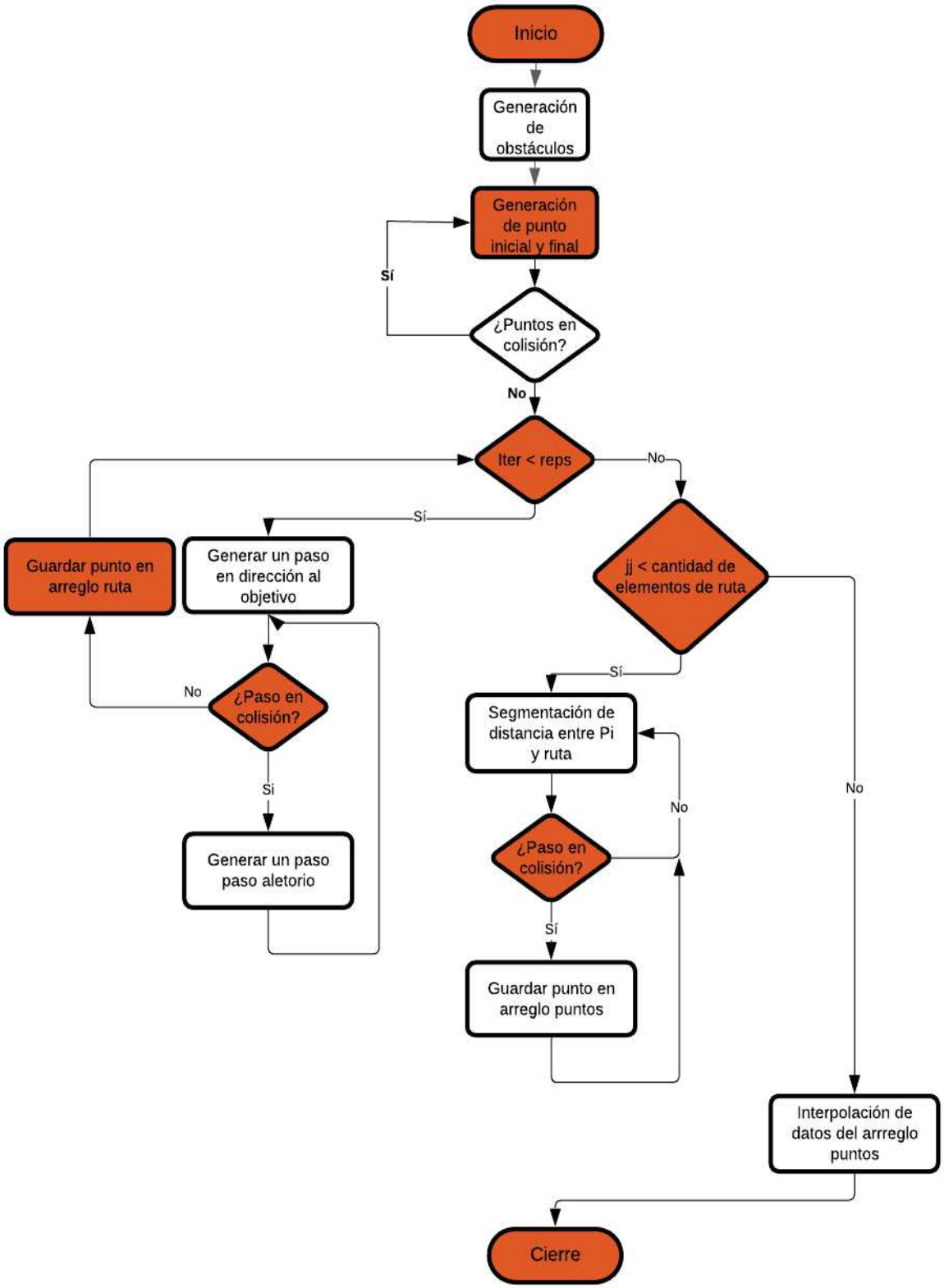


Ilustración 1. Diagrama de flujo del sistema

3. Resultados

En la figura 1 se pueden apreciar los resultados de la función generación de ruta, donde se muestran veinte obstáculos generados aleatoriamente de ancho y alto de dos unidades, dentro de un área de trabajo delimitada.

La ruta se ve generada por los puntos obtenidos en la función siempre en dirección hacia el objetivo a excepción cuando evita colisionar.

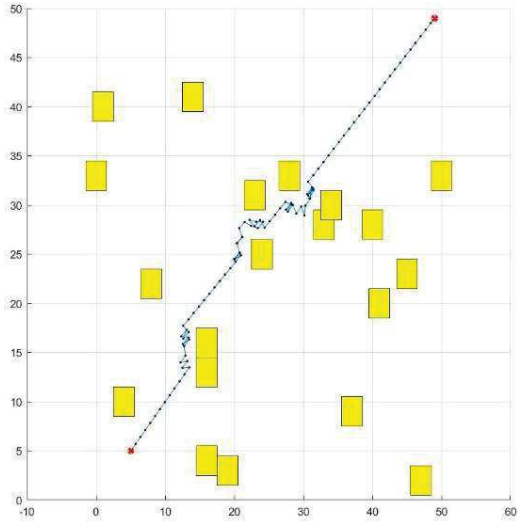


Figura 1. Ruta generada en un área de trabajo con 20 obstáculos con dimensiones de 2x2, punto inicial y final fijos.

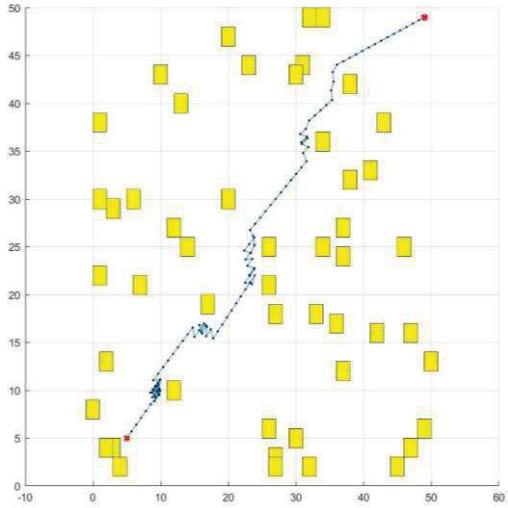


Figura 2. Ruta generada en un área de trabajo con 50 obstáculos con dimensiones de 2x2, punto inicial y final fijos.

En esta figura 2 se muestra un segundo experimento en el cual se generaron 50 obstáculos, lo cual dificulta la generación de la trayectoria, debido que al seguir en dirección al objetivo constantemente resulta en colisiones. Además, en secciones de la ruta generada se observa que realizar un paso de manera aleatoria no es suficiente y se deben realizar dos o más.

La generación de la ruta en un área de trabajo con las mismas condiciones, mismos obstáculos y en las mismas posiciones, resultará siempre en rutas distintas o muy parecidas, pero nunca iguales esto debido a la condicionante de colisión que genera un paso aleatorio en respuesta al punto inválido propuesto.

En la siguiente figura en color rojo, sobre la ruta generada inicialmente, se aprecian los puntos mínimos aplicando la función ruta de puntos mínimos. Puntos que pueden unirse con una recta en forma secuencial sin provocar una colisión con algún obstáculo.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 241 - 253, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

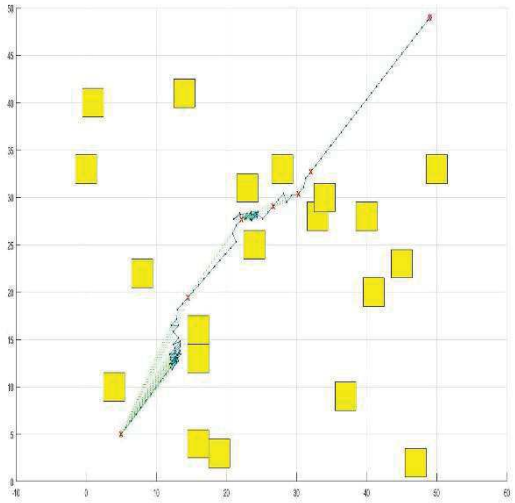


Figura 1. Aplicación de función puntos mínmos en la ruta inicial generada

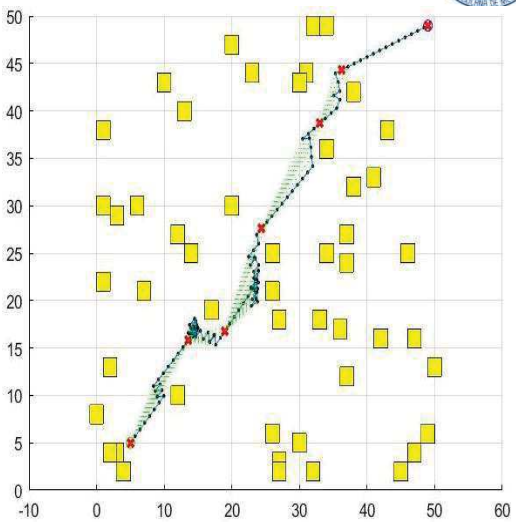


Figura 3. Aplicación de función puntos mínmos en la ruta inicial generada.

En escenarios con una cantidad mayor de obstáculos generados se obliga a la ruta inicial a tener una complejidad mayor, es decir, la ruta tendrá más desviaciones lo cual se puede observar en la figura 4, y a su vez un número mayor de puntos mínimos a diferencia del primer experimento.

Como lo indica la función ruta de puntos mínimos, se evalúa la distancia entre el punto inicial y el siguiente lo cual sucede hasta encontrar una colisión, en la figura 4 con líneas punteadas en verde se puede observar la evaluación entre cada uno de estos puntos y en forma de cruz los puntos sobre los cuales se pueden trazar rectar y unirlos evitando cualquier colisión.

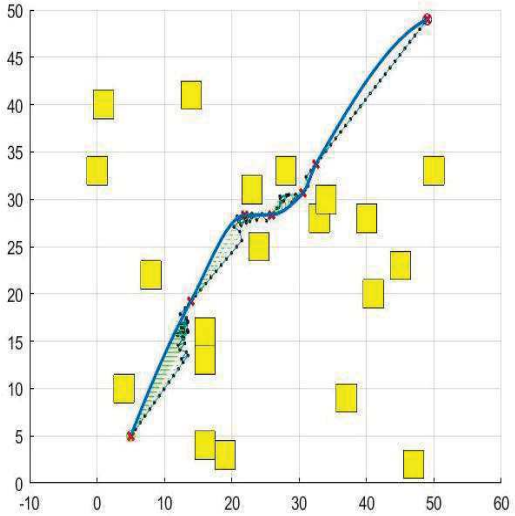


Figura 4. Spline generado con los puntos mínimos, primer experimento.

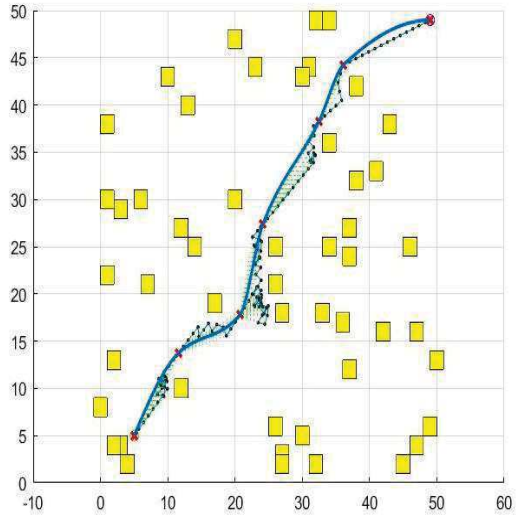


Figura 5. Spline generado con los puntos mínimos, segundo experimento.

Como parte final del experimento se realiza una interpolación de los puntos en color rojo, lo cual resulta en una trayectoria más agradable de ser implementada en un robot móvil.

La figura 7 muestra el error del experimento, dicho error debe converger a cero indicando que se eliminó el error una vez el objetivo fue alcanzado.

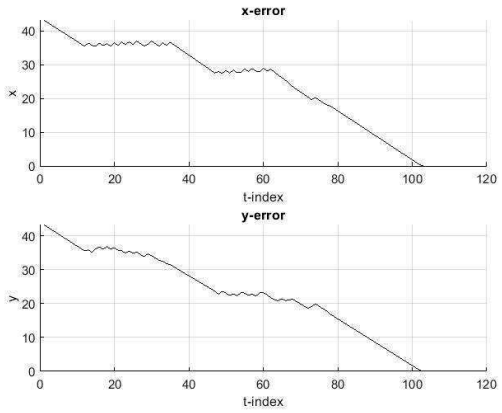


Figura 6. Error calculado de la rua inicial, primer experimento

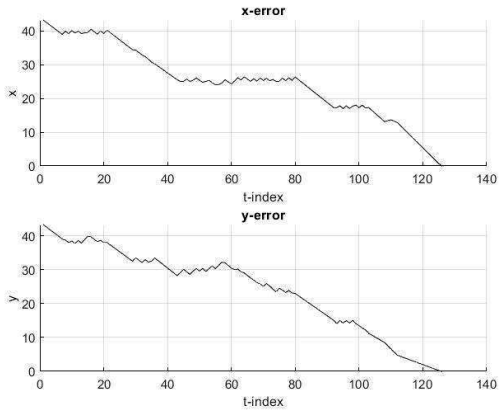


Figura 7. Error calculado de la rua inicial, segundo experimento.

En comparación a la gráfica del error del primer experimento, la figura 8 presenta más perturbaciones, como se mencionó anteriormente, debido a la mayor cantidad de obstáculos generados.

Hay que hacer mención que en el eje de las abscisas es el iterador quien denota cómo se comporta el error con cada repetición.

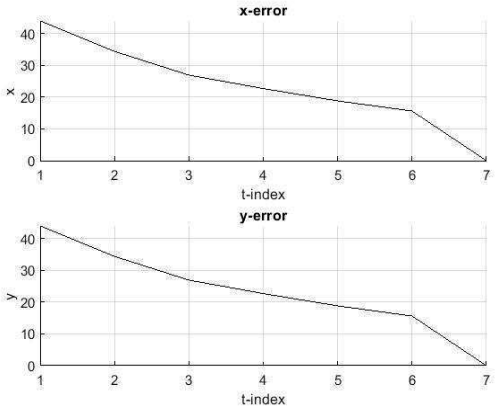


Figura 8. Error calculado del Spline con respecto al punto final, segundo experimento.

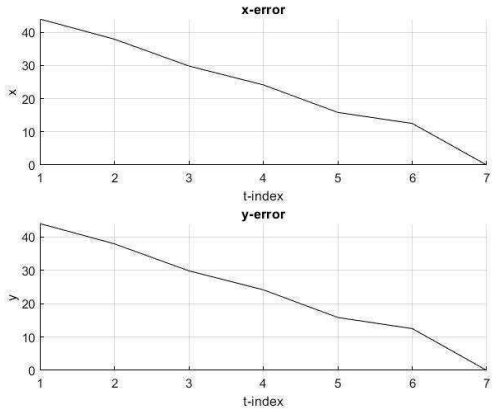


Figura 9. Error calculado del Spline con respecto al punto final, segundo experimento.

En la figura 9 y 10, se observa que la cantidad de iteraciones es solo siete en ambos casos, es debido a que son los puntos mínimos que encontró la función encargada de esto y se puede observar que la convergencia del error es de manera más suave en diferencia a la figura 7 y 8.

4. Conclusiones

Concluimos que esta variación del método RRT para la generación de trayectorias es una buena herramienta cuando el área de trabajo no está tan ocupada por obstáculos que impidan el tránsito, ya que la característica de ir siempre al objetivo lo hace rápido.

Por otra parte, podemos decir que no nos encontramos muy alejados de la era en donde la mayoría los medios de transporte serán tripulados autónomamente, por lo cual, la generación de trayectorias es un tema de interés del cual se seguirán elaborando más tecnologías con la intención de facilitar el transporte de las personas o cargas.

En última instancia, creemos importante mencionar que el *path-planning* tiene una gran cantidad de aplicaciones. No solo se limita a autos para transporte de personas, también puede utilizarse para manejo de material dentro de un almacén e inclusive en líneas de producción.

5. Trabajo futuro

Actualmente se trabaja con la obtención de los parámetros necesarios para la implementación en un robot de tipo diferencial, es decir, conocer los criterios para que le modelo cinemático permita al robot desplazarse siguiendo la trayectoria generada anteriormente.

De igual manera, se plantea escalar a una tercera dimensión este mismo algoritmo con la intención de utilizarlo en dispositivos aéreos, con el cual controlando los parámetros de movimiento pueda ejecutar una ruta en espacio.

Referencias

[1] Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., Scaramuzza, D., & Arkin, R. C. *Introduction to Autonomous Mobile Robots,* MIT Press, England, segunda edición, 2004.

[2] Batlle, J.A., Barjau, A. *Holonomy in mobile robots*, *Robotics and Autonomous systems*. Elsevier, vol. 57, no. 4, pp. 433-440, 2009.

[3] LaValle, S. *Planning algorithms, Cambridge university press*, England, primera edición, 2004.

[4] Murphy, R., Murphy, R. R., & Arkin, R. C. *Introduction to AI robotics, MIT press*, England, primera edición, 2000.

[5] Kumar, N. V., & Kumar, C. S. *Development of collision free path planning algorithm for warehouse mobile robot*, *Procedia computer science*. Elsevier, Vol. 133, pp. 456-463, 2018.

[6] Abbadi, A., Matousek, R., Jancik, S., & Roupec, J. *Rapidly-exploring random trees: 3D planning*, *18th International Conference on Soft Computing MENDEL*, MENDEL, pp.594-599, Czech Republic, 2012.

[7] Rodriguez, S., Tang, X., Lien, J. M., & Amato, N. M. *An obstacle-based rapidly-exploring random tree*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006, IEEE, 895-900, Orlando, Florida, 2006.

[8] Adiyatov, O., & Varol, H. A. *A novel RRT*-based algorithm for motion planning in dynamic environments*, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation,* IEEE, pp. 1416-1421, Takamatsu, Japan, 2017.

[9] Peng, J., Huang, Y., & Luo, G. *Robot path planning based on improved A* algorithm*, *Cybernetics and Information Technologies.* De Gruyter Open, vol. 15, no.2, pp.171-180, 2015.

[10] Choset, H. M., Hutchinson, S., Lynch, K. M., Kantor, G., Burgard, W., Kavraki, L. E., & Thrun, S. *Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementation,* MIT press, England, primera edición, 2005.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 20, pp. 254 - 266, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Desarrollo de una Estación de Trabajo Automatizada para el Proceso de Llenado de Botellas de Agua de 250 ml

Alejandre-Flores Marisol[1], Zamacona-Sánchez Daniel[1], Ríos-Cruz Edgar Roque[1] y García-Cortés Rocío[2]

[1]Instituto Politécnico Nacional CECyT 2 Miguel Bernard; [2]Instituto Politécnico Nacional Secretaria de Investigación y Posgrado
maf.6im05@gmail.com

Resumen

***E**n el presente artículo se plantea el diseño y construcción de una estación de trabajo para una célula de producción automatizada, que permita el adiestramiento de los operadores y de personal relacionado en las líneas de producción, para ello se propuso un sistema de control por medio de un Relé LOGO 12/24RC para el proceso de llenado por medio del envió de señales y respuesta de las mismas, además se implementó una placa Intel galileo generación I para el sistema de seguridad en dicho proceso, que permitirá la disminución de los accidentes de trabajo por causa de los actos inseguros. Como resultado se obtuvo una Estación de trabajo para el proceso de llenado de botellas de agua de 250 ml con un sistema de seguridad; que apoyara al adiestramiento de los estudiantes y de personal, así como la disminución de riesgos de trabajo por actos inseguros cometidos por falta de capacitación.*

.

Palabras clave: Estación de trabajo, proceso de llenado, Relé LOGO 12/24RC, Placa Intel galileo generación I, sistema de control, sistema de seguridad, Ladder, adiestramiento.

1. Introducción

Actualmente, el cambio tecnológico constituye un fenómeno en el desarrollo del capitalismo, lo cual ha modificado los sistemas productivos y ha originado aumentos en la escala de producción. El sistema de producción en masa se distingue por su orientación hacia la fabricación de productos en alto volumen, utilizando maquinaria flexible (programable).

Con el objetivo de incrementar el proceso de producción en gran escala de productos, las innovaciones que se han realizado en las líneas de producción siguieron dos trayectorias: una hacia el perfeccionamiento de la secuencia, consiguiendo que las operaciones se realicen de manera casi automática y con la disminución del tiempo empleado. Y la otra, hacia una automatización total de la línea de producción en el modo operativo.

En términos generales, una línea de producción o de montaje, es un proceso de fabricación de un producto, que mediante la división del trabajo se realiza en fases y operaciones reguladas entre sí[1]. Debido al cambio de la mecanización a la automatización, se han generado diversos problemas dentro de las líneas de producción. Hoy en día el elemento básico en la industria es el Controlador Lógico Programable (PLC), cuya función principal es controlar los sistemas y procesos presentes en la industria. Los sistemas automáticos modernos usan en su gran mayoría PLCs, los cuales se

encargar de coordinarlos. Claramente, la industria actual requiere de personas capacitadas y con conocimientos en automatización. Así que uno de los mayores retos es encontrar la manera de enseñar la programación de los PLCs a los estudiantes en ambientes similares. [2].

La programación del PLC es usualmente enseñada en niveles medio superior y superior, en donde los centros educativos carecen de recursos para que los estudiantes puedan programar los PLCs en ambientes similares a la industria o en ambientes controlados o simulados.

Dentro de la industria de la Automatización se han eliminado los movimientos innecesarios y excesivos, esto provoca en el operador que su trabajo sea repetitivo y monótono. En el Manual de evaluación y prevención de riesgos en líneas automáticas de producción, existen riesgos de accidentes más graves derivados de las características de las nuevas tecnologías de la automatización como lo son los riesgos derivados de la maquinaria móvil y del uso de energía eléctrica. [3]. De acuerdo con la Organización Internacional del Trabajo, a diario ocurren cerca de 868 mil accidentes de trabajo, de los cuales 1100 suceden en México. En la mayoría de los casos, los accidentes de trabajo suceden debido a las condiciones peligrosas que existen en los equipos, maquinarias e instalaciones, así como por la actitud o actos inseguros de los trabajadores al realizar sus actividades.

En ese sentido y a continuación, se detallarán algunos trabajos de interés que han sido reportados en la literatura sobre desarrollo de estaciones de trabajo para el proceso de llenado y que sirvieron de referencias para el presente artículo. En [4] 1950 Rino Bardi, junto con 3 técnicos empezaron a proyectar y fabricar las primeras máquinas para llenar y lavar botellas de leche, para 1960 la empresa R. BARDI había construido su primera máquina llenadora de botellas de leche. Esta misma empresa desarrollo en 2008, una máquina de producción en serie, llenadora y taponadora a gran velocidad para botellas de 5 hasta 12 Litros, donde se producían hasta 5,000 botellas por hora, llenas de leche de vaca para consumo. En el año 2015 la Universidad Politécnica de Madrid realizó un proyecto de nombre, “Diseño y logística de una línea de elaboración de zumo de naranja natural refrigerado de 20.000 l/día”. Denominando el término como llenado aséptico, es decir que no pueda provocar una infección en el proceso, este tipo de llenado puede usarse para cualquier tipo de fluido o producto pastoso procesado por la industria alimentaria, se seleccionó una envasadora para zumos de la empresa “Canopack”, la cual dispone del llenado y taponado en estas condiciones. Además, suelen utilizarse del tipo bag-in-box y bag-in-drum, donde se llenan unas bolsas con el zumo para finalmente ser introducidas en cajas o bidones. [5]. Por otro lado, en un artículo publicado el 1° de marzo del 2018 por EXCELSIOR, se menciona la creación por parte del IPN de una embotelladora dirigida a microempresas, la cual llena, tapa y sella una lata-botella de 500 ml en un minuto, el proyecto llamado “EMBOMEX” está fabricado con materiales económicos, haciéndola una herramienta de trabajo de bajo costo. Este proyecto fue programado con un lenguaje sencillo como son los microcontroladores (PIC), sin embargo, para las industriales utilizan los Controladores Lógicos Programables (PLC). El proceso comienza al colocar cuatro botellas en el primer módulo; posteriormente se activan las boquillas, que bajan para sacar el líquido que llena las botellas. Cuando se completa esta tarea las boquillas regresan a su posición original y los contenedores, colocados en la parte inferior, a través de bombas peristálticas, suben el agua sobrante para evitar que gotee y se desperdicie.

Es por ello que se pretende el desarrollo de una Estación de trabajo automatizada que permita simular una línea de producción de un proceso de llenado de botellas de plástico de 250 ml, que resuelva el problema del adiestramiento en las líneas de producción de los estudiantes o de personas que estén involucradas, de esta manera se podrá programar por medio de un Relé inteligente LOGO 12/24 RC y las diferentes variables de la estación de trabajo, así como la implementación del sistema de seguridad que pueda ser controlado por una placa Intel galileo generación I para la reducción de riesgos de trabajo en las líneas de producción.

El presente artículo está organizado de la siguiente forma, en la sección 2 se describe el diseño de la estación de trabajo para una célula de producción para el proceso de llenado de botellas de 250 ml. En la sección 3 la propuesta de programación para el sistema de control por medio del Relé inteligente 12/24RC y la implementación del sistema de seguridad con la placa Intel galileo generación I. En la sección 4, se presenta las pruebas realizadas con el sistema control, así como a la estación de

trabajo para el proceso de llenado. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones del artículo y posibles opciones de mejora en la Estación de trabajo.

2. Estación de Trabajo para una Célula de Producción

La estación está diseñada para realizar un proceso completo de llenado, a través del cual se pueden estudiar, programar y operar los diferentes elementos necesarios para efectuar este proceso. El adiestramiento del personal abarca las áreas de electrónica y el control de procesos por medio del Relé inteligente LOGO Siemens 12/24RC y la placa Intel Galileo I.

Este proyecto consiste en la construcción de una célula de producción para el proceso de llenado de botellas de 250 ml, está se conforma por una banda transportadora de 1 metro de longitud impulsada por un motorreductor, el control del avance de la banda transportadora está por medio del relé inteligente LOGO 12/24RC , por su parte el proceso de llenado será por medio del uso de una bomba de agua de 12VCD, la cual estará controlada por el relé inteligente, además de tener un sistema de seguridad para evitar accidentes el cual consta de un sensor fotoeléctrico para evitar que el operador cometa actos inseguros durante su operación.

El proceso de la estación estará controlado por medio del Relé inteligente LOGO 12/24RC y la placa Intel Galileo generación I y a través de estos elementos se lleva a cabo la programación. Por otro lado, la estación cuenta con un gabinete eléctrico sobre el cual han sido emplazados botones de encendido, apagado y paro de emergencia. El proceso se efectúa de manera automatizada.

2.1 Diseño de la Estación de trabajo

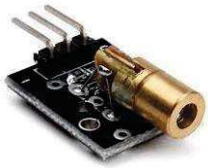
La estación de trabajo está integrada por los siguientes componentes: Una mesa de trabajo en la cual estará fijado un módulo de Relé Inteligente LOGO 12/RC Siemens, una placa de desarrollo Intel Galileo Generación I, un gabinete eléctrico con un botón selector el cual controlara todo el funcionamiento de la máquina, un botón de encendido, uno de apagado, lámparas de señalización las cuales indicarán el estado en el que se encuentra la máquina, una fuente de alimentación de 24VCD y 5VCD, una banda transportadora, una bomba de agua de 12V que se encargará del proceso de llenado, así como unos sensores de obstáculos cuya función será detectar cuando las botellas estén en la estación de llenado, y un sistema de seguridad por medio de un sensor fotoeléctrico.

2.2 Características Técnicas de los Elementos a utilizar

Los elementos y componentes utilizados para la estación de llenado se enlistan en la Tabla 1.1, con sus características técnicas más importantes.

Nombre del Elemento	Imagen	Características Técnicas
LOGO! 12/24 RC		*Tensión de alimentación: 24V AC/DC *Intensidad de corriente: 20-75 mA *Entradas: 8 digitales 10A, 240V AC *Salidas: 4 digitales 3A, 120V AC *Programación: Diagrama de Escalera o por diagrama de Bloques

Fuente de alimentación ABB		*Tensión de entrada: 115-230V AC *Tensión de salida: 24V DC, *Intensidad de corriente de salida: 5 A
Intel Galileo Generación I		*Tensión de alimentación: 5V DC *Intensidad de corriente: 3A *Entradas/Salidas: 14 digitales, 800mA, 5V DC *Salidas de modulación de ancho pulso (PWM): 6 salidas 800mA 0-5V DC *Entradas analógicas: 6, desde A0 hasta A5 *Programación: lenguaje C++, en la IDE Arduino 1.5.3
Botón pulsador		*Voltaje: 400 V AC *Intensidad de corriente: 10A *Contactos NA y NC
Botón selector		*Voltaje: 400 V AC *Intensidad de corriente: 10A *Vías: 2 posiciones
Lámparas indicadoras		*Voltaje: 127V AC/DC *Intensidad de corriente: Mayor o igual a 20mA
Motorreductor		*Voltaje: 24V DC *15 kg 100 RPM

Sensor de obstáculos		*Voltaje: 5V DC *Rango de Alcance: 0-40 cm *Intensidad 5mA
Sensor de luz		*Voltaje: 5V DC *Salida digital: 1 *Salida analógica: 1
Sensor Laser		*Voltaje: 5V DC *Alcance: 0 – 80m
Bomba de agua 12V		* Potencia: 60W * Voltaje: 12V DC * Capacidad de flujo: 5.0 litros por minuto * Temperatura de 100 °C * Distancia de succión: 2m *Presión nominal: 0.8Mpa *Presión de aspiración: 0.2Mpa

2.3 Diseño de la Estructura

La estructura de la mesa de trabajo está fabricada con una placa negra lisa con las dimensiones de 120 cm x 60 cm, como se muestra en la Figura 2.1.

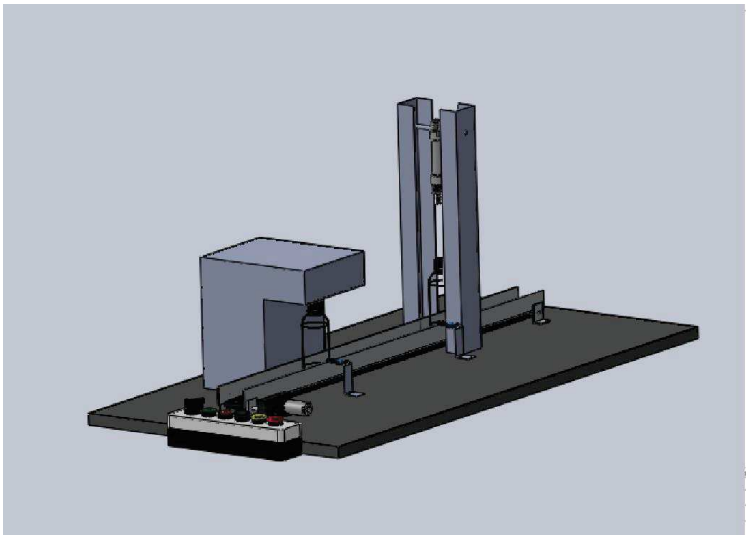


Figura 2.1 Estructura de la estación de trabajo

2.4 Diseño eléctrico

En la Figura 2.2 se encuentra representado el diagrama pictórico de los componentes eléctricos que se emplearán realizado en el software CADeSimu.

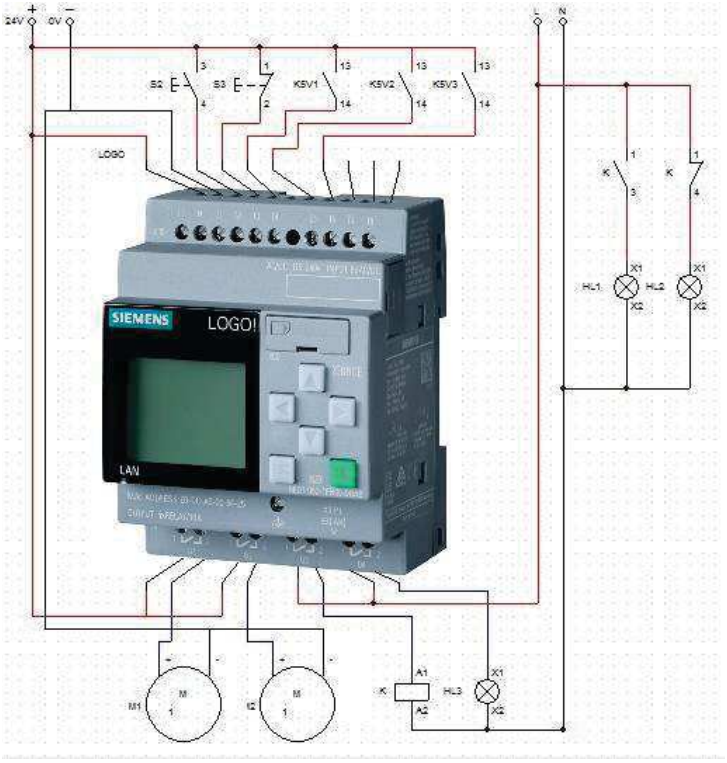


Figura 2.2 Diagrama pictórico

En la Tabla 1.2 se muestra las entradas y las salidas de los componentes utilizados para el control con el relé LOGO 12/24RC.

Tabla 1.2 Tabla de Asignación de Variables en el relé LOGO

Tabla de Asignación de Variables en el relé LOGO	
Etiqueta en LOGO SoftComfort V8	Descripción
I1	Botón de arranque
I2	Botón de paro
I3	Señal de Relé a 5v
I4	Señal de Relé a 5v
I5	Señal de Relé a 5v
M1	Relé interno
M2	Relé interno

M3	Relé interno
M4	Relé interno
B005	Temporizador a la conexión
B006	Temporizador a la desconexión
B012	Temporizador a la conexión
Q1	Motor de la banda
Q2	Bomba de agua
Q3	Relé externo
Q4	Lámpara indicadora amarilla

2.5 Diseño Electrónico

En la Figura 2.3 se encuentra representado el diagrama pictórico de los componentes que se emplearán realizado en el software Fritzing.

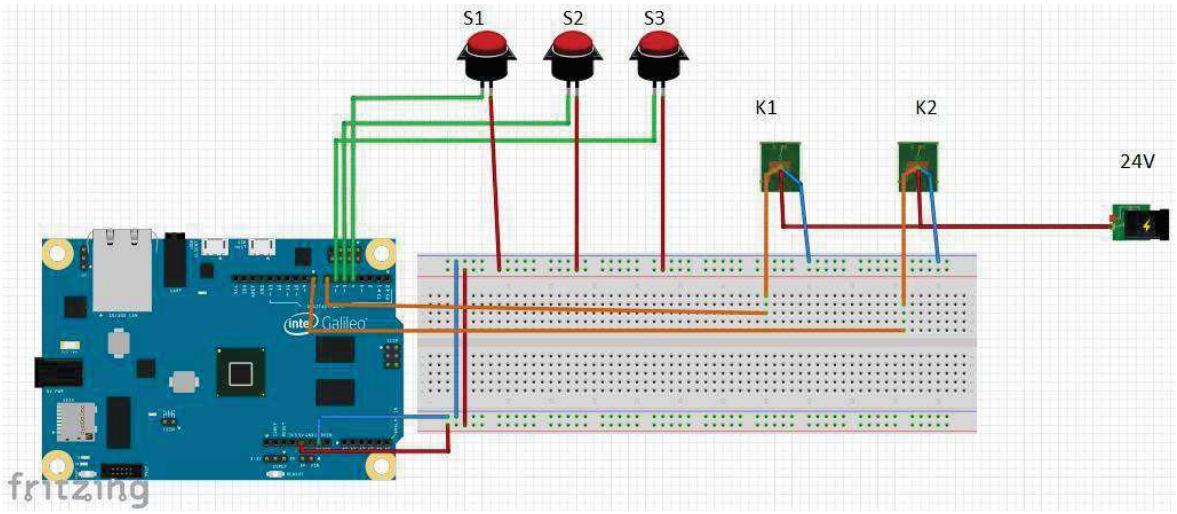


Figura 2.3 Diagrama pictórico en Fritzing

La placa Intel Galileo Gen I tendrá conectado un sensor de obstáculo, y un relevador para el proceso de llenado, el sensor de obstáculo se conecta al pin digital 4, y el relevador se conecta al pin digital 6. Cuando el sensor detecte la botella, la placa Intel Galileo enviara una señal alta al Relevador 1 lo cual hará que este cambie de estado de NA (normalmente abierto) a NC (normalmente cerrado), el relevador dejara pasar 24 volts que recibirá el Relé inteligente, además la placa tendrá otro sensor de obstáculos para cuando la botella llegue hasta el final de la banda, el sensor activara el relevador 2 el cual mandara una señal al Relé Inteligente para que pare la banda, además como sistema de seguridad se incluyó un sensor fotoeléctrico el cual recibirá luz de un láser, cuando este no reciba luz mandara una señal a la placa Intel Galileo y por medio del relevador 2 mandara una señal para que el relé inteligente pare la banda.

En la Tabla 1.3 se puede apreciar las conexiones de cada componente con la placa Intel Galileo Generación I.

Tabla 1.3 Tabla de Asignación de Variables en la Placa Intel Galileo Generación I

Tabla de Asignación de Variables en la Placa Intel Galileo Generación I	
Elemento	Pines
Sensor de obstáculos 1	Pin D4 (Entrada)
Sensor de obstáculo 2	Pin D5 (Entrada)
Sensor fotoeléctrico	Pin D6 (Entrada)
Relevador 1	Pin D7 (Salida)
Relevador 2	Pin D8 (Salida)

2.6 Programación Ladder

La programación de la placa Intel Galileo Generación I se encarga de detectar las botellas con el sensor de obstáculos en la estación de llenado y mandar una señal al relé LOGO para que este detenga la banda transportadora y accione la bomba de 12V. El tablero de control funciona a través de un Relé inteligente LOGO! 12/24RC usando el lenguaje de programación por medio de diagramas de funciones por bloques (FBD), en la Figura 2.4 se muestra el diagrama de bloques de la programación en el software LOGO! Softcomfort V8 el cual se encarga de controlar principalmente el funcionamiento de la banda transportadora y el proceso de llenado.

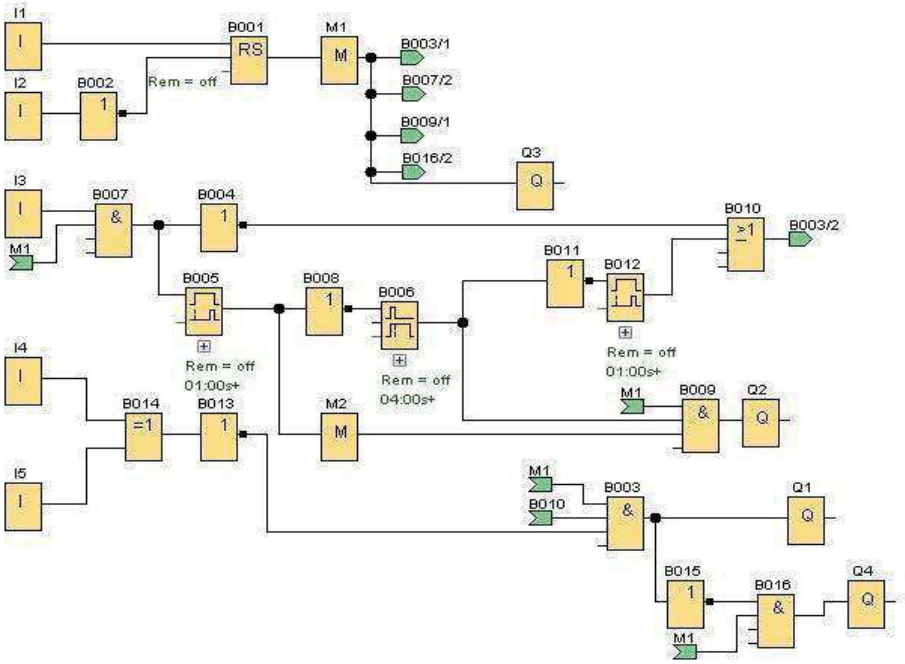


Figura 2.4 Diagrama de Bloques del Funcionamiento de la Banda Transportadora y el proceso de llenado

3. Pruebas realizadas a la Estación de Trabajo automatizada

Finalmente, para validar y verificar que la Estación de Trabajo automatizada realiza el proceso de llenado de botellas de agua de 250 ml se realizaron algunas pruebas a los diferentes sistemas que se describen de manera detallada a continuación:

a) Prueba de Comunicación PC-Relé inteligente LOGO!: En esta prueba se comprobó la comunicación entre la computadora y el Relé inteligente por medio del cable Ethernet ver Figura 3.1

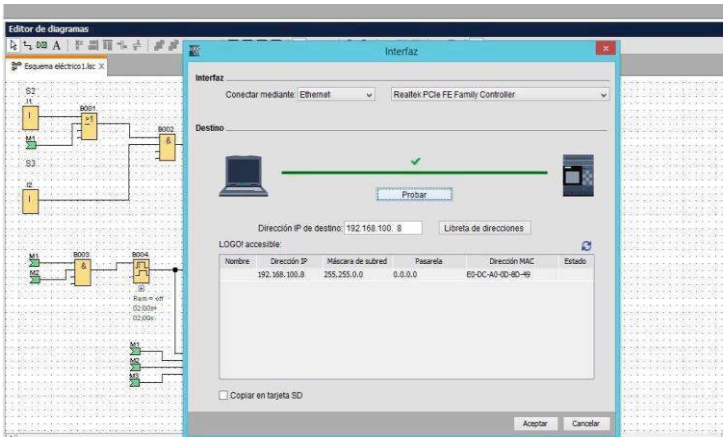


Figura 3.1 Transferencia del programa desde la computadora al relé inteligente

b) Prueba de Funcionamiento de la Bomba de Agua de 12V: En esta prueba se verifico el funcionamiento de la bomba de agua se lleve a cabo de manera correcta luego de recibir las señales del relé inteligente LOGO 12/24RC Siemens, como se muestra en la Figura 3.2.

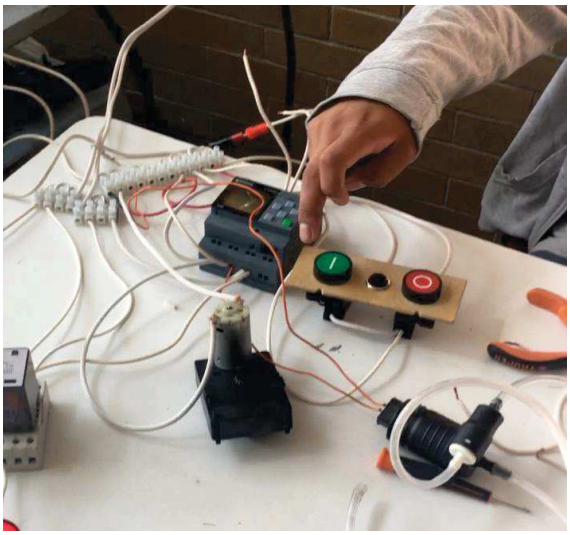


Figura 3.2 Conexión física de la Bomba de Agua de 12V

c) Prueba de Funcionamiento del Sensor de Obstáculos: En esta prueba se Verifico que el funcionamiento del sensor de obstáculo detecta la presencia de la botella y al detectarla su salida tenga una señal alta, ver Figura 3.3.

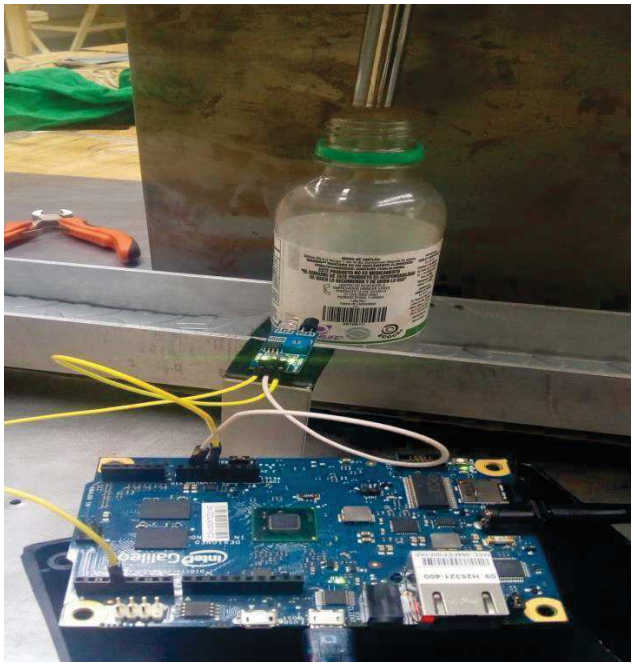
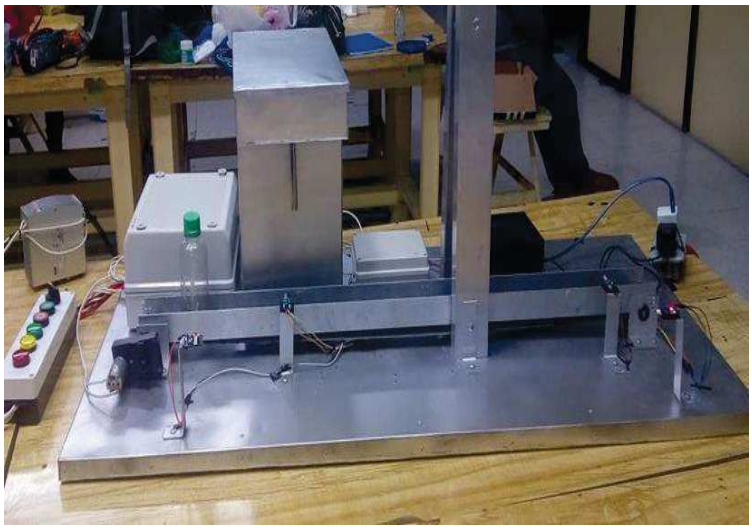


Figura 3.3 Funcionamiento del Sensor de Obstáculos

d) Prueba de validación**:** La estación de llenado funciono correctamente en conjunto con la banda transportadora de acuerdo con la programación que se realizado en el relé inteligente LOGO 1224/RC y es capaz de llenar una botella de agua de 250 ml, además de que el sistema de seguridad también funciona de manera correcta de acuerdo con la programación que se realizó desde la placa de desarrollo Intel Galileo Generación I ver Figura 3.4.

Figura 3.4 Funcionamiento de la Estación de Llenado



4. Resultados

Finalmente al concluir con el desarrollo del proyecto se obtuvieron resultados importantes y de gran interés, como lo fue el **diseño, construcción de la estación de trabajo para una célula de producción en el proceso de llenado de botellas de agua de 250 ml utilizando la programación por medio de un PLC o relé inteligente 12/24RC marca Siemens**, así como la **implementación de un sistema de seguridad que permita el paro del Sistema por medio de señales enviadas desde la placa Intel galileo generación I al Relé inteligente**, esto permitió que los alumnos de nivel medio superior tuvieran la experiencia de interactuar en la programación de una estación de trabajo similar a las utilizadas en la industria.

A lo largo de este proyecto se presentaron diversas dificultades, una de ellas fue la manufactura de la banda transportadora, puesto que para evitar que ésta no tirara las botellas, se usó un canal de aluminio, y para mover el vinil, se usaron rodillos de aluminio manufacturados en tornos dentro del plantel, un problema que se tuvo fue que un motorreductor de 5 kg, no tenía la suficiente fuerza para mover la banda, por lo que se cambió por un motorreductor de 15 kg. Otro problema que se tuvo fue que el vinil se atoraba en uno de los rodillos por lo que se tuvo que adaptar la banda con otro tipo de material para que pudiera funcionar de forma correcta. Sin embargo, la estación de llenado funciono correctamente, tanto la parte mecánica como la programación trabajaron adecuadamente como se tenía establecido y con este proceso no hubo ninguna complicación.

5. Conclusiones

Para concluir, el proyecto cumplió con el objetivo general que se planteó al inicio, el cual era diseñar y construir una estación de trabajo para una célula de producción, con el fin de facilitar el adiestramiento al operador.

De acuerdo con el objetivo general establecido se planteó el diseño y construcción de una estación de trabajo para una célula de producción, que automatizo el proceso de llenado de botellas de 250 ml de agua para una línea de producción; implementando un sistema de control por medio de la programación del Relé inteligente LOGO 12/24RC Siemens y la placa Intel Galileo generación I; que permitió una solución viable para el adiestramiento del operador y del personal involucrado en las

líneas de producción, así como para el desarrollo de competencias en los principales programas de estudio a nivel técnico y profesional.

Cabe mencionar que se implementó un sistema de seguridad el cual es gobernado por la placa de desarrollo, con la finalidad de que, al detectar un comportamiento ajeno al proceso, este detenga totalmente el funcionamiento de la célula.

Por lo anterior, se logró que por medio de la Estación de trabajo para el proceso de llenado permita a los operadores y a los estudiantes el desarrollo de las competencias para la operación, programación por medio de diferentes lenguajes de programación como lo son Bloques lógicos y diagrama de escalera, la instalación del Relé inteligente y la placa Intel galileo generación I, además de la instalación de elementos de entrada y salida, funcionamiento de la estación de trabajo y la detección de fallas de manera intuitiva, evitando de esta manera los riesgos en el trabajo causado por condiciones y actos inseguros. Se tiene como trabajo a futuro implementar una estación de taponado para completar el proceso de producción de bebidas, además de agregar una pantalla SIMATIC HMI Siemens con la cual se puede controlar las variables de los procesos, incrementando la disponibilidad y, por tanto, la productividad de la estación de trabajo, con la finalidad también de visualizar el proceso que se está llevando a cabo, si hay un paro de emergencia e indique cuando el proceso haya terminado. También se tiene pensado hacer la configuración del sistema de programación, para que la célula de producción pueda ser controlada por medio de otros PLC's diferentes al relé inteligente LOGO 12/24RC. De igual manera se tiene pensando hacer la implementación de un circuito para la protección de todo el sistema de control.

6. Agradecimientos

Se agradece al Instituto Politécnico Nacional a través de la Secretaria de Investigación y Posgrado por el apoyo otorgado para la realización de este trabajo mediante la aprobación del proyecto de investigación SIP-20180186, así como de los alumnos tesistas Alba Proa Karina Daniela, Cleofás Tolentino Hugo Yahir, Islas Ortiz Mihael Shamed quienes desarrollaron una parte muy importante en el proceso de construcción del prototipo.

Referencias

[1] González Martínez, J. *La producción en serie y la producción flexible*. México, D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.(2003)

[2] CACERES, C. A.; AMAYA, D. Desarrollo e interacción de un laboratorio virtual asistido y controlado por PLC. **Entre Ciencia e Ingenieria**, Pereira , v. 10, n. 19, p. 9-15, June 2016 . Available from <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672016000100002&lng=en&nrm=iso>. access on 13 Apr. 2019.

[3] Cursos, M. *Manual para la evaluación y prevención de riesgos en líneas automáticas de producción | Libro Virtual*. Libro Virtual - Tus libros digitales. Recuperado el 3 marzo del 2018.Sitio web: https://www.librosvirtual.com/manual/manual-para-la- evaluacion-y-prevencion-de-riesgos-en-lineas-automaticas-de-produccion

[4] Díaz Herrero, D. *Diseño de una llenadora automática con capacidad para llenar 25,000 botellas de 475ml. de vinagreta grandma en un turno de 8 horas* (Licenciatura en Ingeniería Mecánica.). Universidad de las Américas Puebla 2010.

[5] *Diseño y logística de una línea de elaboración de zumo de naranja natural refrigerado de 20.000l/día*. (2015) (pp. 34-35). Madrid, España. Recuperado de:

https://www1.etsia.upm.es/acreditacion2015/Evidencias_IAL/TFC/Isabel%20Alonso%20Cabezas/Isabel%20Alonso%20Cabezas.pdf

[6] *Desarrollo de Electrónica de Control de Instrumentos para Instrumentación Analítica basada en PLC.* (2015). In: IEEE Xplore. Chennai, India: KVNSVPL Narasimham, pp.1-3.

[7] Excélsior. (2018). Crea IPN embotelladora dirigida a microempresas, pp. 1-2. Recuperado: http://www.excelsior.com.mx/nacional/2018/03/01/1223663

[8] *Un Concepto para pruebas de Hardware en el circuito PLC usando una extensión de Texto Estructurad*". (2017) In: IEEE Xplore. Limassol, Chipre: David Thönnessen, pp.1-6.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 21, pp.267 - 278, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Holgura del Conjunto Carcasa-Rotor de una Turbina no Convencional

Rojano Merchant José Ignacio, Bedolla Hernández Marcos y Bedolla Hernández Jorge

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Apizaco, Av.Tecnológico S/N, cp. 90300, Apizaco, Tlaxcala, México ignacio.rojano.merchant@hotmail.es

Resumen

Se presenta el análisis de la holgura en el conjunto rotor-carcasa de una miniturbina no convencional. La holgura entre estos elementos reduce la eficiencia de la turbina ya sea debido a la posible dispersión del flujo o al contacto presentes en el conjunto. El análisis se desarrolla para un diseño propuesto de una turbina con discos planos en el rotor, a partir del cual se genera el modelo discreto mediante el software comercial de elemento finito Abaqus® 6.14. Con el modelo obtenido se simula la respuesta a la fuerza centrípeta del rotor y los efectos térmicos de sus componentes debido a las temperaturas del fluido. El análisis presenta un disco y un separador de manera independiente, las simulaciones se realizan para diferentes temperaturas en las que se puede encontrar el fluido de trabajo y diversas velocidades angulares que puede llegar a alcanzar este tipo de máquinas, para conocer el efecto que tienen en la deformación del rotor, además se hace un análisis de la deformación máxima presente bajos las condiciones de operación del diseño propuesto. Finalmente se presenta la discusión del análisis de la holgura recomendable para este tipo de microturbinas.

Palabras clave: turbina, rotor, deformación, holgura.

1 Introducción

En la actualidad la situación energética no es sólo un problema para México, es de orden global. El petróleo, el gas y el carbón ya no bastan para la creciente demanda mundial de energía [1], todas las sociedades necesitan de servicios energéticos para cubrir las necesidades humanas básicas, por ejemplo, de alumbrado, cocina, ambientación, movilidad y comunicación.

La problemática es que se asume el sistema de estructura del sector energético actual como único. Funciona de la siguiente manera; la generación de electricidad del sistema eléctrico se lleva a cabo en centrales, ya sean fósiles, nucleares o renovables. Una vez generada la electricidad, debe transportarse. El Transporte se lleva a cabo a través de torres de alta tensión, mediante los cables. Cuando la electricidad llega cerca del punto de suministro, la Distribución se encarga de asegurar que llegue a los puntos de demanda [2]. No se trata de un sistema simple, pero es funcional, el inconveniente que se tiene son las pedidas debido a diferentes factores, el rendimiento de las centrales eléctricas que va del 35% al 58% [3], las pérdidas de distribución que son cerca del 13% en el 2015 [4], por lo que se llega a la conclusión de que no es un sistema eficiente. Esto es lo que se llama un sistema de generación centralizado, donde la electricidad se genera en forma centralizada en grandes cantidades y luego es enviada por las líneas eléctricas hacia una gran cantidad de casas y negocios.

Dependiendo de la fuente primaria de energía utilizada, las centrales generadoras se clasifican en químicas (radioactividad), termoeléctricas (carbón, petróleo, gas, nucleares y solares) hidroeléctricas (mareomotrices) eólicas y solares fotovoltaicos [5]. Un elemento generador en común que tienen todas las centrales con excepción de las solares fotovoltaicos, está conformado por un alternador conectado a una turbina, las cuales son costosas además de que requieren un estricto control sobre las condiciones del fluido con el que opera, un mantenimiento periódico y tienen eficiencias no mayores al 50%.

La turbina es un motor rotativo que convierte en energía mecánica la energía de una corriente de agua, vapor de agua o gas. El elemento básico de la turbina es la rueda o rotor, que cuenta con palas, hélices, cuchillas o cubos colocados alrededor de su circunferencia, de tal forma que el fluido en movimiento produce una fuerza tangencial que impulsa la rueda y la hace girar [6], este puede ser utilizado directamente para el accionamiento de un dispositivo, que en la mayoría de los casos es un alternador, para convertir dicho trabajo en energía eléctrica a este proceso se le conoce como generación de energía [7]. Las microturbinas funcionan de forma similar con la diferencia de que son sistemas "pequeños", que, si bien el rango específico de operación y generación de potencia reportado en la literatura es variado, se considera de forma común que sus rangos de salida de potencia se encuentran en el orden de kW hasta 500 kW. Estas son una de las tecnologías de microgeneración existentes en la actualidad.

La microgeneración permite conseguir ahorros de hasta un 40% de energía primaria, ya que se reducen las pérdidas de energía eléctrica en el transporte y distribución de electricidad. Se trata de una de las tecnologías que se denomina de generación distribuida (GD) [3], la cual el DPCA (Distribución Power Coalition of America) la define como, cualquier tecnología de generación a pequeña escala que proporciona electricidad en puntos mas cercanos al consumidor que la generación centralizada y se puede conectar directamente al consumidor o a la red de transporte o distribución. Por otro lado, la Agencia Internacional de la Energía (IEA, Internacional Energy Agency) considera como GD, únicamente, la que se conecta a la red de distribución en baja tensión y la asocia a tecnologías como motor, mini y microturbinas, pilas de combustible y energía solar fotovoltaica [8].

De acuerdo a las propiedades de las turbinas convencionales, para la microgeneración, la construcción de estas no se justifica, por ello como alternativa, se encuentra la turbina Tesla debido a las características con las que cuenta, principalmente su bajo costo de construcción, la flexibilidad en cuanto a las propiedades del fluido que requiere para su funcionamiento y casi nulo mantenimiento.

La turbina Tesla (turbina sin alabes), nombrada así por Nikola Tesla, científico que la patento en 1913, está formada por un rotor, que consiste en una serie de discos con una separación por arandelas montados en un eje, una boquilla por la cual es inyectado un fluido, ya sea gas o liquido en el borde de los discos provocando su movimiento, causado por la transferencia de impulso entre los discos y el fluido debido a las propiedades de la viscosidad y adhesión. Los discos cuentan con un corte alrededor del centro para comunicarse con los orificios de escape formado en el costado de la carcasa, esto dando a lugar que el fluido entre radialmente y salga axialmente a través de los puertos mencionados anteriormente. Por lo tanto, la turbina de tesla se describe como disco múltiple, fuerza cortante o turbomáquina de capa límite. Este tipo de turbina se caracteriza por la capacidad de poder funcionar con cualquier tipo de fluido, ya sea compresible como aire y vapor o incompresibles como el aceite, además de que es tolerante con las impurezas del fluido. [6] [9]. Esto aunado a su bajo costo de fabricación y los bajos o casi nulos costos de mantenimiento la hacen una opción a considerar para la microgeneración.

El diseño del rotor propuesto consta de una flecha continua, de un lado es hueco para permitir el desfogue del fluido, y del otro salido para la transmisión de potencia. El lateral solido del eje tiene una perforación con rosca la cual junto con un tope y un tornillo permiten ejercer presión de forma axial al rotor para mantener unidos firmemente los discos planos y sus separadores, formando el compacto del rotor, los cuales se pueden considerar como estructuras de pared delgada. El análisis presentado considera las condiciones iniciales del rotor, esfuerzos y su dilatación térmica, para establecer la deformación total del rotor, y el cambio de estas en función de las condiciones de operación de la turbina. El estudio se desarrolla mediante simulaciones numéricas con el software de elemento finito Abaqus®, el cual permite obtener los valores requeridos.

El presente artículo se estructura de la siguiente forma. Se presenta una descripción de la turbina y las principales características junto con las partes principales que la conforman. Posteriormente se muestra las condiciones de la alternativa del rotor propuesto y sus componentes. A continuación, se describe las condiciones del modelo discreto que se utiliza para el análisis incluyendo

las condiciones de carga y de interacción. Para finalizar se presentan los resultados de las simulaciones seguido de las conclusiones del estudio.

2 Turbina no convencional

En 1913, Nikola Tesla patentó una turbina sin aspas, que utiliza una serie de discos giratorios para convertir la energía cinética de un fluido en rotación mecánica, que se puede utilizar para realizar un trabajo útil. [9]. Aunque la función primordial de la turbina sin alabes es la misma que una turbina convencional, la principal diferencia reside en el principio de operación y la simplificación de la manufactura, ya que al no contar con alabes de geometría compleja, los costos de fabricación disminuyen, dando como resultado una construcción más económica. El principio de funcionamiento se basa en el principio de adhesión, en el cual debido a la viscosidad ocurre un intercambio de momento entre el fluido y los discos del rotor, desarrollando un par y potencia en la flecha.

El interés por la investigación de estos sistemas se debe a la facilidad de aplicación de esta máquina para la generación en sistemas distribuidos, relacionándose con sus ventajas de operación y mantenimiento. Algunas de las características que se están considerando para su estudio son las siguientes [10] :

- Propiedades del fluido de trabajo (presión, temperatura, densidad, viscosidad), las cuales pueden tener amplio rango de variación, sin que eso limite su operación.
- Velocidad del flujo, la cual puede ocasionar cambios en la velocidad angular de la turbina.
- Par torsor, que es función del número, diámetro y espesor de discos.
- Espacio entre discos, que se modifica relativamente fácil con la posibilidad de usar una amplia variedad de fluidos de trabajo.
- Velocidad de rotación, relacionada por la velocidad del flujo, fuerzas viscosas y el radio del disco.
- Eficiencia de la tobera, el número de éstas y su distribución circunferencial es un aspecto que influye en el desempeño global de la turbina.
- Valores altos de holguras radiales y axiales entre el rotor y la carcasa provocan mayor dispersión del flujo, lo que se traducen en pérdidas de eficiencia.

En el diseño de este tipo de microturbinas es necesario tomar en cuenta todas sus características, a lo largo de la historia el foco de atención ha sido el comportamiento del fluido y los efectos que tiene en los discos del rotor, aunque es un aspecto relevante, no hay que dejar de lado el aspecto estructural ya que de este depende el adecuado funcionamiento de la turbina. Uno de los problemas que perjudican el funcionamiento de la máquina es el contacto entre los discos con la carcasa. Cuya condición puede presentarse debido a la configuración del rotor y sus características geométricas, de masa y rigidez. La holgura entre la carcasa-rotor de manera axial y radial, juega un papel importante, ya que la deformación radial de los discos, ocasionada por la fuerza centrípeta presente durante movimiento que existe en su funcionamiento, junto con la dilatación térmica que tienen los componentes, debido a su interacción con el fluido, puede ocasionar contacto entre el conjunto carcasa-rotor (holguras inferiores) o perdidas de eficiencia debido a la dispersión del fluido (holguras superiores). Respecto a esto no hay estudios realizados, en general el mayor foco de estudio es el comportamiento del fluido, en cambio es escasa la información del análisis estructural y principalmente enfocado a los espacios entre el conjunto carcasa-rotor, más sin embargo el aspecto estructural tiene particular importancia y debe de considerarse debido a las fuerzas inerciales, velocidades a las que está sometido y reducidas holguras.

En base a las consideraciones de trabajo de una turbina sin alabes, el presente estudio considera el análisis de los esfuerzos y dilatación térmica del rotor. La cual tendrá vapor de agua como fluido de trabajo, donde la temperatura de saturación es de 135 °C con una presión promedio de 690 kPa. El cual es generado por una caldera industrial alimentada con biomasa sólida. La turbina está conformada por los elementos estáticos mostrados en la figura 1 y se encuentran enlistados en la tabla 1 numerados como se indica en la figura 1, la cual tiene una breve descripción de cada uno de

ellos. Ya que el rotor es el principal componente a analizar y debido a la complejidad de este no se incluye en la figura y se dedicara la sección siguiente para detallar los aspectos principales del rotor.

Tabla 1 Elementos que componen la turbina

N.°	Nombre de pieza	Descripción	Cant.
1	lateral derecha	placa 3/8“	1
2	lateral izquierda	placa 3/8”	1
3	camisa	4 1/2" nominal	1
4	contenedor rodamiento izquierdo	Alojamiento rodamientos izquierda	1
5	contenedor rodamientos derecha	Alojamiento rodamientos derecha	1
6	soporte triangular	soporte hecho de placa 3/8"	4
7	soporte inferior	soporte hecho de placa 3/8"	2
8	tobera	Tobera	1
9	junta camisa	O-ring estandar espesor 2.62 mm. y D.I. 120.32 mm.	2
10	junta rodamientos	O-ring standar espesor 1.78 mm. D.I. 37.82 mm.	2
11	barrilla roscada	Barrilla roscada m5 70mm calidad Inox.	6
12	Tornillo Allen Avellanado	Tor. Allen cab. plana M3, AISI 304, DIN 7991	8
13	Rondana M5	Rondana plana M5	12
14	Tuerca M5	Tuerca hex. regular M5 calidad Inox.	12

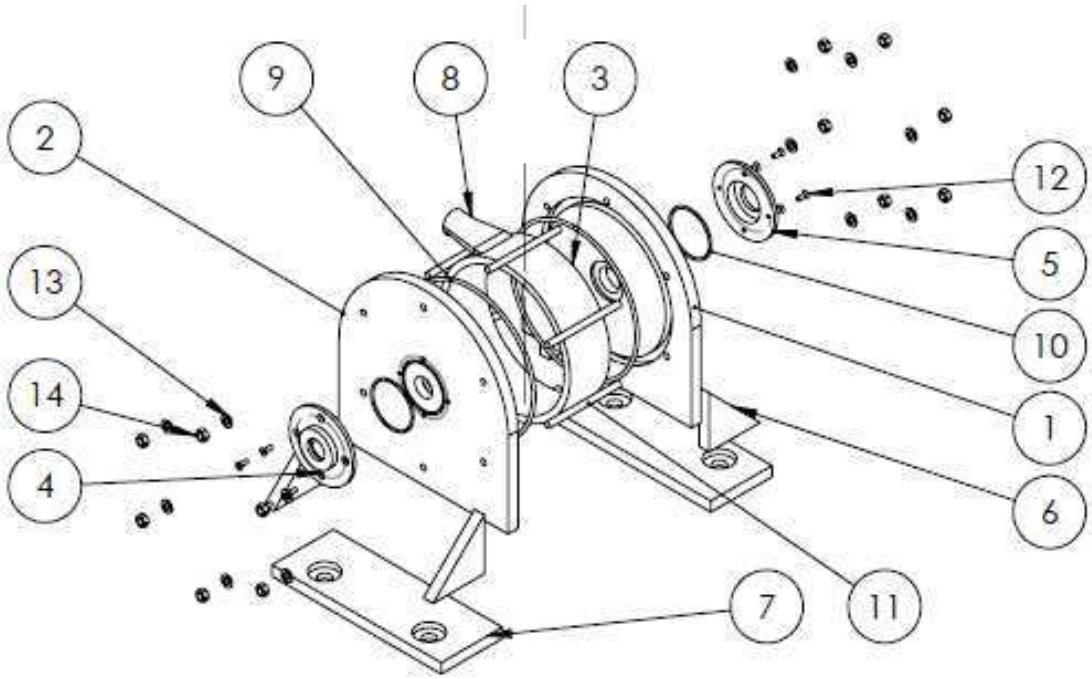


Figura 1 Esquema de los elementos que componen la turbina

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 21, pp.267 - 278, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

3 Rotor de la turbina no convencional

La turbina está formada por un rotor, que consiste en una serie de discos con una separación por arandelas montados en un eje, una boquilla montada en la orilla exterior de los discos por la cual entra el fluido, en forma de gas o líquido, generalmente dirigido tangencialmente a su periferia, originando su funcionamiento, esto gracias a que genera transferencia de impulso entre este y los discos debido a las propiedades viscosas y de adhesión. Los discos cuentan con un corte alrededor del centro para comunicarse con los orificios de escape formado en el costado de la carcasa, esto dando a lugar que el fluido entre radialmente y salga axialmente a través de los puertos mencionados anteriormente. El funcionamiento descrito anteriormente ocasiona que los discos están sometidos a fuerzas de inercia centrípeta, además dependiendo del fluido tendrá un gradiente de temperatura lo que provoca deformación adicional al disco debido a la superficie de contacto, este al ser el elemento más frágil del rotor debido a su constitución, se requiere garantizar su integridad estructural para las condiciones de operación y a su vez considerar la deformación máxima que llegara a tener el disco para poder determinar el ajuste conveniente entre el conjunto carcasa-rotor.

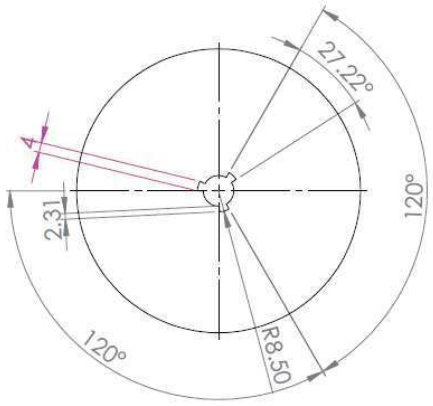


Figura 2 Medidas del disco de la turbina sin escala y acotaciones en mm.

Para el diseño de la turbina se seleccionó un diámetro de disco de 115 mm, el espesor de los discos es fundamental ya que en el diseño es preferente a tener valores cercanos a 0 mm; sin embargo, debido a las condiciones de operación de la turbina se determina su espesor debido a la rigidez y resistencia mecánica resultando en espesor de 0.89 mm, correspondientes a un grosor de lámina calibre 20, el centro del disco cuenta con un radio interno de 17 mm, el cual tendrá tres ranuras por los que estarán sujetos al eje, en la figura 2 se muestra su dibujo con las medidas correspondientes .

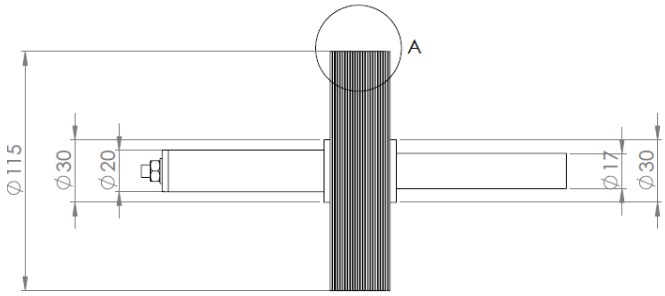


Figura 3 Medidas del rotor de la turbina sin escalas y acotaciones en mm.

En el diseño propuesto el eje está conformado por dos flechas atornilladas, una con diámetro externo de 17 mm y otra con diámetro de 20 mm en el cual van montados un total de 24 discos y 69 espaciadores, en la figura 3 se muestran las medidas correspondientes, el material seleccionado para los disco es acero inoxidable AISI 430 debido a su alta resistencia a la corrosión, del cual se muestran sus propiedades en la tabla y para el resto de los componentes es decir los separadores y el eje se utilizo acero inoxidable AISI 304 formando un compacto con una separación entre discos de 0.33 mm, formando el rotor de la turbina. En la figura 4 se muestran enumerados los elementos del rotor y en la tabla 4 un listado en conjunto a una breve descripción de dichos componentes.

Tabla 2 Elementos componentes del rotor

N.°	Nombre de pieza	Descripción	Cant.
1	Eje motriz	Eje motriz de la turbina	1
2	Eje contenedor	Eje contenedor de la turbina	1
3	Disco	Disco del rotor hecho con lamina cal.29	1
4	Separador	Separador de discos hecho con lamina cal.29	1
5	Tornillo Allen	Torn. Allen Din 912 Cal. Inox. 912 M6x90	1

Tabla 3 Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 431

Propiedades	Magnitud	Unidad.
Modulo elástico	200	GPa
Límite elástico	310	Mpa
Coeficiente de Poisson	.29	-
Densidad	7740	Kg/m^3
Coeficiente de expansión térmica	$10.4x10^{-6}$	$°C^{-1}$

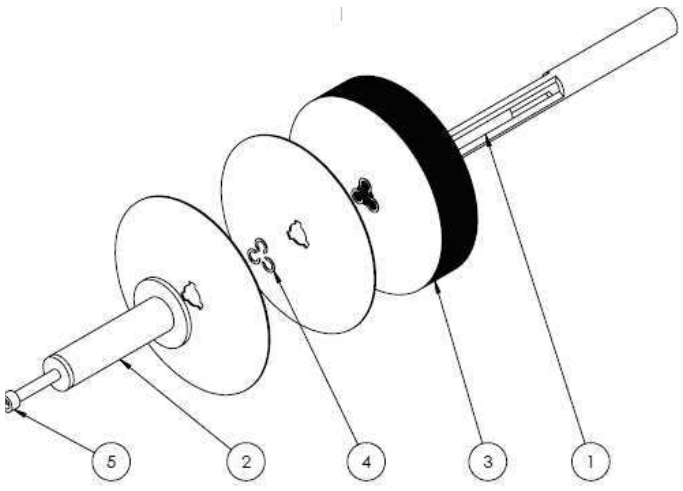


Figura 4 Elementos componentes del rotor

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 21, pp.267 - 278, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

4 Modelo discreto del rotor

En el presente estudio no es necesario considerar el ensamble del rotor completo mostrado en la figura 2 para la discretización y posteriormente el análisis de elemento finito, ya que la parte principal que puede ocasionar contacto entre la carcasa-rotor, es el disco en cualquiera de las direcciones ya sea *x*, *y* y *z.* por lo que en primera instancia se considera solamente un disco para el análisis de deformación térmica y la deformación ocasionada por la fuerza centrípeta, ya que todos los discos están construidos con la misma geometría y el mismo material, de manera axial hay influencia de otros elementos a parte de los discos, los separadores, los cuales influyen solamente en esta dirección debido a las dimensiones que presenta en las direcciones *x* y *y*, debido a estas condiciones se requiere realizar un análisis de deformación térmica en uno de estos, ya que todos los separadores cuentan con las mismas condiciones de manufactura tanto de material como de geometría.

En función de lo planteado anteriormente, se considera que la deformación del rotor depende del disco y los separadores por lo que, para conocer su comportamiento se realiza un análisis de elemento finito del disco para obtener los esfuerzos y deformaciones en los rangos de operación que tiene la turbina, siendo de 1000 rpm a 5000 rpm, además este tipo de turbinas tienden a trabajar en altas revoluciones dependiendo del flujo masico que se le aplique, por lo que, además se realiza la simulación con valores de funcionamiento superiores a los estimados, siendo de 10000 rpm y 15000 rpm, dando un panorama mas amplio de la relación existente entre la deformación existente y la revoluciones de la turbina. También se realiza un análisis de deformación térmica considerando dos temperaturas, de 100 °C, 150 °C y 200 °C, las cuales están en el rango que tiene el fluido de trabajo dentro de la turbina. Para el caso de los separadores es suficiente realizar el análisis de la dilatación térmica con las temperaturas propuestas, en ambos casos es suficiente para tener una noción del comportamiento que tendrá

El modelo discreto tanto del disco y del separador, se muestran en la figura 5 el cual se realizó de acuerdo a la geometría de la figura 4, para el material se ingresaron los valores de las propiedades que se encuentran en la tabla. La discretización se elaboró con elementos finitos tipo Brik de 8 nodos procurando su uniformidad.

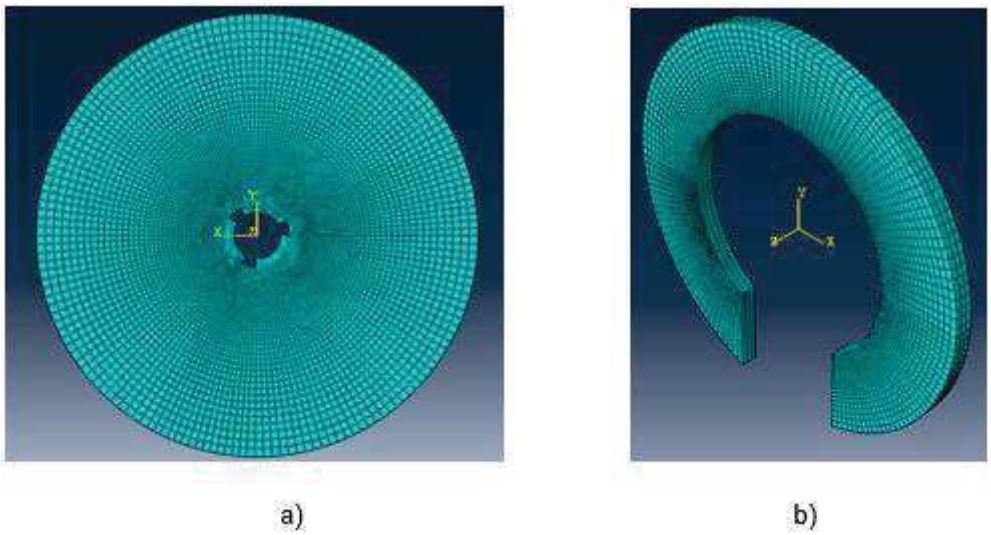


Figura 5 a) Modelo discreto del disco b) modelo discreto del separador

El modelo discreto del disco mostrado en la figura 5 a) cuenta con 7880 elementos y un total de 16152, con una mayor densidad de malla en la parte interna del disco, ya que la geometría

presenta discontinuidades geométricas, en la figura 5 b) se encuentra el modelo discreto del separador, este no cuenta con una discontinuidad en su geometría por lo que no requiere un refinamiento de malla en una zona específica, por lo que el mallado quedo constituido por 7920 elementos y un total de 11172 nodos.

5 Resultados

El objetivo del análisis numérico realizado, consiste en determinar la holgura mínima necesaria entre el conjunto carcasa-rotor, mediante el estudio de las deformaciones máximas que puede tener el rotor de la turbina debido a la deformación por dilatación térmica y al esfuerzo por la fuerza centrípeta. Además, conocer la relación existente entre ambos con la deformación, para así conocer el impacto que tienen en la deformación del rotor.

Para conocer el comportamiento que tiene la deformación con respecto de la fuerza centrípeta provocada por la velocidad angular, se ingresan en las pruebas las restricciones de movimiento del disco, las velocidades de rotación analizadas, van de 0 rpm hasta 20000 rpm con intervalos de 5000 rpm, poniendo énfasis en la velocidad mínima y máxima de operación del rotor, equivalentes a 1000 rpm y 5000 rpm respectivamente. Los resultados obtenidos se observan en la gráfica mostrada en la figura 6, en los cuales se aprecia un comportamiento exponencial de la deformación con respecto a la velocidad angular, aunque en las revoluciones de operación estimadas del presente estudio, la distorsión del elemento es inferior a 0.001 mm, por lo que se determina que con sistemas de altas frecuencias de operación, superiores a las 10000 rpm es un dato a tomar en consideración, esto sin tomar en cuenta el impacto que tendrá el aumento o reducción del radio del disco.

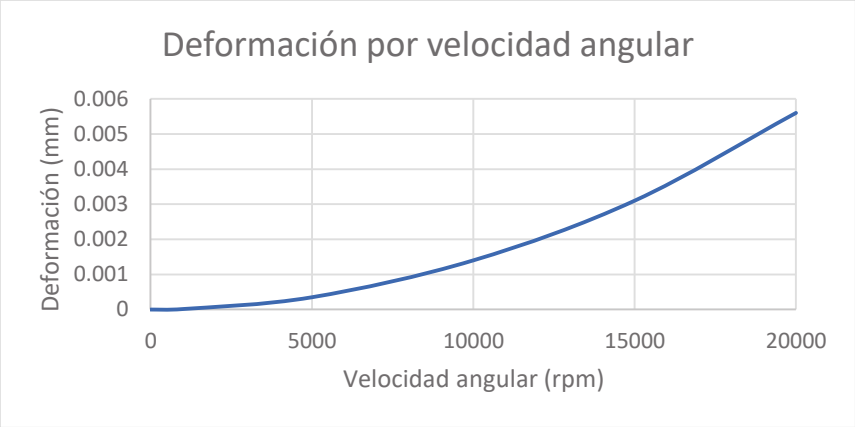


Figura 6 Relación velocidad angular-deformación del disco

En la figura 7 a) se muestra la deformación mínima presente en el disco con una velocidad angular de 1000 rpm en la dirección *y* siendo de1.405 E-05 mm, por otra parte en la figura 7 b) que es la que se encuentra del lado derecho se muestra la deformación máxima de $3.509x10^{-04}$ mm presente en el disco, dentro de los parámetros establecidos de operación, con un esfuerzo de 4.509 MPa, siendo inferior en comparación al límite elástico del material, evitando una deformación permanente y dando pie a la posibilidad de rangos de operación superiores a los establecidos para el presente diseño.

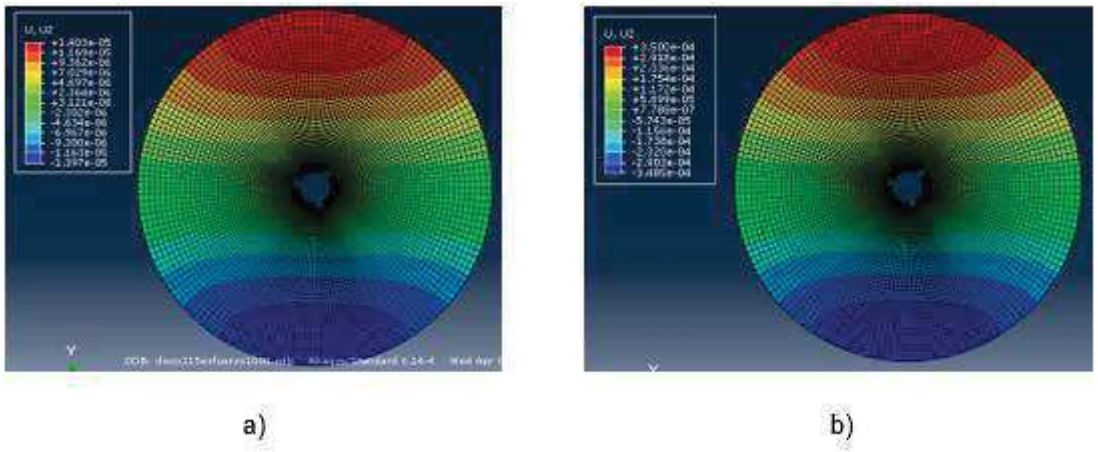


Figura 7 a) Deformación en y mínima de la disco por velocidad angular b) deformación máxima en y del disco bajo carga de operación por velocidad angular

Para conocer el comportamiento de la deformación presente en el disco debido a la dilatación térmica se realizó un análisis ingresando las temperaturas que van desde 100 °C hasta 200 °C, con intervalos de 25 °C, la cual depende del fluido a utilizar. Los resultados obtenidos se muestran en la gráfica de la figura 8. Como se puede observar el impacto que tiene la temperatura en la deformación del disco es lineal, en el rango de los 100 a los 200 grados, en rangos superiores se tiene que evaluar debido a el coeficiente de dilatación térmica del material, también se tiene que tomar en consideración que el diámetro del disco influye en la dilatación de este, por lo que a un mayor diámetro esta será superior.

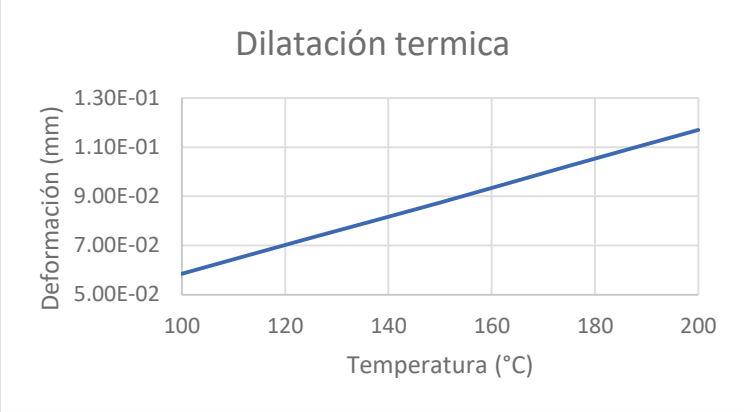


Figura 8 Relación temperatura deformación del disco

Por otra parte, en la figura 9 se presentan los resultados obtenidos a 200°c; se muestra la deformación en la dirección *x* siendo de $1.17x10^{-1}$ mm, la cual por la geometría tiene un valor de similar magnitud en la dirección *y* , por otra parte, la deformación en la dirección *z* del disco tiene un valor de $2.388x10^{-3}$, la cual es mínima, podría ser despreciable, pero debido a la cantidad total de elemento que se tiene en esta dirección, siendo un total de 24 disco, esto sumado a la cantidad de separadores existentes en el rotor y la baja holgura presente, se considera para el análisis global de la dilatación térmica en esta dirección.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 21, pp.267 - 278, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

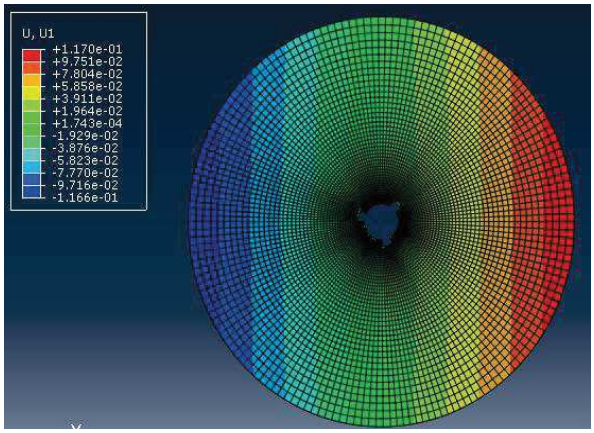


Figura 9 Deformación en y por gradiente de temperatura en el disco

Se realiza un análisis de dilatación térmica máxima del separador con una temperatura de 200 °C, los resultados se presentan en la figura 10, en el lado izquierdo, figura 10 a) se tiene la deformación en la dirección z y en el lado derecho la figura 10 b) la deformación en la dirección y, como se puede observar en la dirección z se tiene una deformación de $1.729x10^{-3}$ mm, la cual es reducida y podría ser despreciable, pero por la cantidad de elementos que intervienen en esta dirección es un valor a considerar en el análisis de deformación del rotor en esa dirección; en cambio la dirección *x* y *y* al no presentar posibilidad de contacto con la carcasa, se omiten para el análisis del rotor.

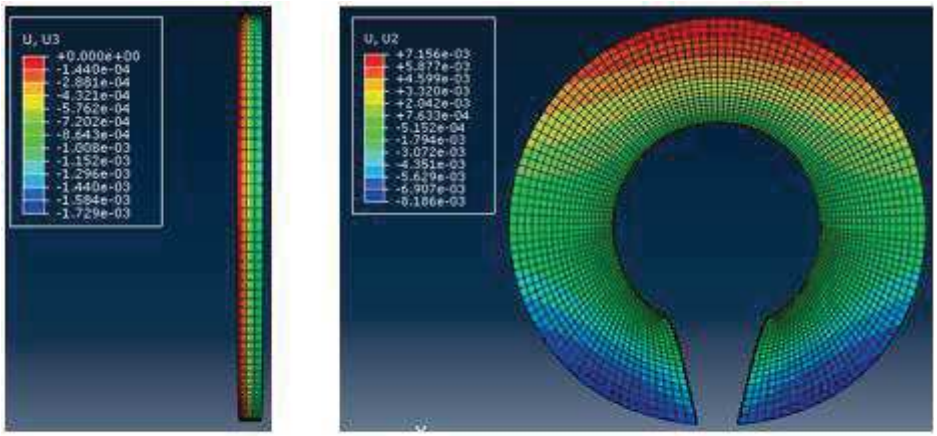


Figura 10 a) Deformación en z por dilatación térmica en el separador, b) deformación en y por dilatación térmica en el separador

El diseño de la turbina no convencional, el cual fue objeto de estudio en el presente documento, cuenta con una separación en el conjunto rotor-carcasa, tanto en las direcciones x,y como en la dirección z, las cuales están representadas en la figura 11, teniendo un valor de 0.25 mm en el eje x y y, el cual representa la holgura existente del rotor con la camisa de la turbina (parte superior de la figura) y cuenta con una magnitud de 1.05 mm. del rotor a las laterales, ya sea hacia la izquierda o derecha debido a la simetría presente (lateral derecha de la figura), por lo que en la dirección z el rotor cuenta con el doble del valor señalado.

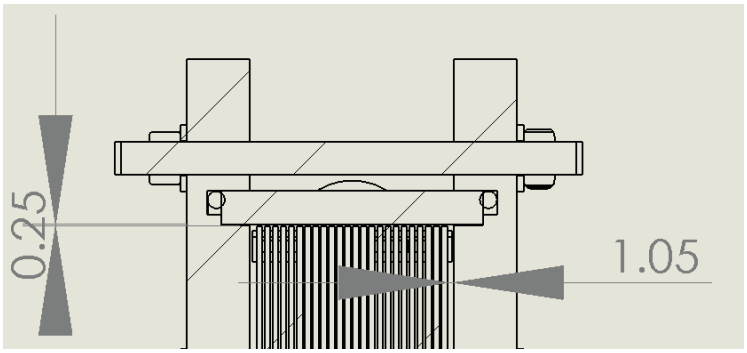


Figura 11 Holgura en el conjunto carcasa-rotor

En la tabla 4 se realiza una recopilación de los datos obtenidos en los análisis FEM para elaborados para el disco y el separador respectivamente, se omitieron las deformaciones en x y y del separador debido a que el diámetro exterior de la carcasa es de 116 mm, siendo superior al del separador de 7.3 mm, por lo que no existe la posibilidad de contacto entre ellos, por lo que solo se considera la dirección en z debido a los 23 elementos que se tienen en dicha dirección.

En el caso del disco todas las componentes son importantes ya que para las componentes x y y existe la posibilidad de contacto con la camisa de la carcasa, la componente z se incluye debido a los 24 elementos que comprende el rotor, por lo que también se incluye la totalidad de la deformación en z de ambos elementos.

Tabla 4 Deformación en el rotor

Deformación	(mm)
δ_x por vel. angular del disco	$3.509x10^{-04}$
δ_y por vel. angular del disco	$3.508x10^{-04}$
δ_x térmica del disco	$1.176x10^{-1}$
δ_y térmica del disco	$1.170\ x10^{-1}$
δ_z térmica del disco	$2.388\ x10^{-3}$
δ_z del separador	$1.729x10^{-3}$
δ_z de los 24 discos	$5.73\ x10^{-2}$
δ_z de los 23 separadores	$3.9\ x10^{-2}$
δ_y total	$1.11735x10^{-1}$
δ_x total	$1.1179\ x10^{-1}$
δ_z total	$9.7\ x10^{-2}$

En la figura 11 se observa que el ajuste que se tiene entre el disco-carcasa en la parte superior es de 0.25 mm, el cual corresponde a las direcciones x y y del disco, en la tabla 4 se muestra que en esta dirección la deformación máxima es de 0.1179 mm, siendo este valor la mitad de la distancia que existente entre la camisa y el disco, dando la posibilidad de reducir más el espacio entre estos elemento, tomando en cuenta la precisión en la manufactura del elemento. Además, en la figura 11 se muestra el ajuste que tienen los discos con las laterales de la carcasa, siendo de 1.05 mm. en ambos lados, dando un total de 2.1 mm de ajuste en el eje z, considerando los valores de la tabla 11, donde la deformación total del rotor debido a los 24 discos y los 23 separadores a lo largo del eje z es de 9.7E-2, la cual es una pequeña parte de la distancia que se tiene en esta componente, por lo que

en este caso no presenta un inconveniente en el funcionamiento de la turbina, y se puede reducir más el ajuste existente llegando al doble de la deformación en z total, igual manera se recomienda considerar la precisión de manufactura, junto con la colocación de la tobera, ya que en el diseño presente se colocó esa separación para procurar la dispersión del fluido en todos los discos, pudiendo establecer una forma de lograr ambas condiciones, es decir una forma en que la tobera abarque todos los disco y permita que el ajuste del rotor y la carcasa sea menor para tener un mejor desempeño. Con base en lo anterior, se valida el funcionamiento de la turbina con un gradiente de temperatura de 200 °C a una velocidad angular de 5000 rpm.

En ambos casos el análisis de dilatación térmica muestra que los ajustes que se tienen, son suficientes para el correcto funcionamiento de la turbina con una carga térmica de hasta 200 °C, los cuales son inferiores a la carga real, por lo que se puede alcanzar dichas condiciones en la turbina sin tener problemas de contacto en el conjunto rotor-carcasa tanto en las laterales como en parte superior (camisa).

6 Conclusiones

Se resalta la importancia que tienen las microturbinas no convencionales como alternativas a la generación de energía distribuida, además las características que se tienen que tomar en consideración para su elaboración junto con las ventajas que este tipo de turbomáquinas ofrece, también se presenta una alternativa de rotor, al cual se realizaron análisis de dilatación térmica y esfuerzos los cuales dan un estimado de las holguras que deberá de tener el conjunto carcasa- rotor, para así evitar la dispersión del flujo y contactos, además de una metodología y características a considerar para determinar dicha cifra.

Los resultados muestran la forma en que se ve afectado el disco de acuerdo al tipo de carga ya sea térmica o centrípeta, además establece la relación existente entre este y la deformación que puede llegar a tener el rotor, dando así un panorama del efecto que tiene la magnitud de carga en la selección de la holgura del conjunto carcasa-rotor y la determinación de cuando es recomendable tomar en cuenta dicho valor y cuando pueden ser despreciables.

Finalmente se concluye que este trabajo aporta a las consideraciones del diseño estructural de este tipo de dispositivos, aspecto el cual es necesario continuar investigando, ya que como se mencionó anteriormente en la literatura se le ha dado prioridad a las condiciones de trabajo del fluido en el interior de la turbina y el efecto que este ocasiona en el rotor.

Referencias

[1] World Energy Council, "*Worl Energy Issues Monitor 2019",* p. 6, 2019.

[2] Comisión para la Cooperación Ambiental, *"Emisiones atmosféricas de las centrales electricas en America del Norte"*, 2011.

[3] Blanco J. y Garcia Bielsa J., *"Guia basica de micogeneración"*, Madrid, Euroiberia Ingenieria S.L., 2012.

[4] CFE, *"Informe anual 2015"*, p. 9, 2015.

[5] Gomez A., *"Analisis y operacion de sistemas de energia electrica"*, McGraw-Hill, Madrid, 1ra ed, 2002.

[6] Muñoz M. y Rovira A., *"Maquinas termicas"*, UNED, Madrid, edicion digital, 2004.

[7] Mataix C., *"Turbomáquinas Térmicas"*, Dossat, 3ra. ed., 2000.

[8] Labein Tecnalia, *"Guía Básica de la Generación Distribuida"*, Madrid, 2007.

[9] Podgornik R., *"The Tesla Turbine"*, University of Ljubljana, 2011.

[10] Bedolla J, Lara V, Bedolla M., "*Alternativa de diseño del rotor en una turbina no convencional"*, XXI congreso internacional anual de la SOMIM, p. 43, Veracruz, 2015.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 22, pp.279 - 290, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Identificación Paramétrica de un Robot Manipulador de 2 Grados de Libertad

Rivera Zurita Abril Lucia, Reyes Cortés Fernando y Félix Beltrán Olga Guadalupe

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica, Maestría en Ciencias de la Electrónica, Opción en Automatización.
abril_rizu@hotmail.com

Resumen

En este trabajo se presenta la metodología usada para la identificación de los parámetros del robot manipulador de trasmisión directa de 2 grados de libertad. La identificación de los parámetros se realiza de manera off-line, con la técnica de mínimos cuadrados estándar y el modelo de regresión de energía. Para validar los resultados, se presenta la simulación en MATLAB de la dinámica del robot de 2 grados de libertad con los parámetros identificados de manera experimental, usando la misma señal de excitación utilizada en la planta experimental.

Palabras clave: Identificación paramétrica, mínimos cuadrados, robot de transmisión directa.

1. Introducción

La precisión, el rendimiento y robustez de algoritmos de control avanzados dependen en buena medida a la precisión de los parámetros que se encuentran en el modelo dinámico, sin embargo, la mayoría de los parámetros son desconocidos incluso para el fabricante.

Las masas de los eslabones, distancias de los eslabones, centros de masa y momentos de inercia pueden ser estimados por tres principales métodos [1]:

1. Mediciones directas de los pesos y dimensiones los elementos del robot. El centro de masa se puede determinar por medio de los puntos de equilibrio de los eslabones y los elementos del tensor de inercia pueden ser obtenidos de movimientos pendulares. Para llevar a cabo el primer método se requiere tener acceso completo al robot, este método no siempre es factible debido a que los motores y eslabones del robot pueden ser grandes y pesados o bien tener una geometría compleja.

2. Modelo 3D del robot. Obtener los parámetros por medio del software con CAD. La implementación del segundo método requiere reproducir de manera fiel el robot teniendo en cuenta todos sus elementos sin olvidar los tornillos, arandelas y tuercas. Esta tarea se complica si no se cuenta con los planos y tipos de materiales del robot.

3. Identificación paramétrica. Este método está basado en el análisis de las entradas/salidas del robot donde las entradas son los pares aplicados a cada articulación y las salidas son la posición, velocidad y aceleración articular. El par aplicado es diseñado como una señal de excitación persistente. Este método no es sencillo, sin embargo, tiene la ventaja de estimar los parámetros inerciales y los parámetros dinámicos, estos últimos se presentan cuando el robot se encuentra en movimiento, entre ellos la fricción.

La identificación paramétrica es un método ampliamente utilizado en la literatura de robots manipuladores con algunas modificaciones dependiendo de los requerimientos del experimento, por

ejemplo, en [2] se realiza la identificación de los parámetros inerciales de un robot manipulador de transmisión directa de 3 grados de libertad, y realiza una distinción de parámetros (totalmente identificable, no identificable y linealmente identificable) encontrando parámetros no identificables y proponiendo establecerlos en cero. En [3] se realiza la parametrización de un robot de trasmisión directa (EDDA) de 2 grados de libertad obteniendo sus parámetros de su modelado en CAD, para ser verificados por medio de método mínimo cuadrados, los resultados fueron muy parecidos ya que el robot fue diseñado y construido en el instituto. En [4] se realiza la parametrización de un robot de transmisión directa de 2 grados de libertad utilizando una técnica de validación por medio de la comparación de la posición y velocidad articular simuladas con la dinámica del robot. En este trabajo se implementa el método de mínimos cuadrados para realizar la estimación de los parámetros y se validan los resultados con la simulación de la dinámica del robot en Matlab.

2. Planta de estudio

En esta sección se realiza una breve descripción de la instrumentación electrónica y las características del robot manipulador. La planta experimental se encuentra en el laboratorio de la Maestría de Ciencias en Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. ROTRADI es un robot manipulador de transmisión directa de 3 grados de libertad (base, hombro y codo).

Figura 1. Robot manipulador de 3 grados de libertad

Las articulaciones del robot se encuentran unidas por articulaciones rotacionales que están compuestas por un servomotor de transmisión directa, un encoder incremental y un servoamplificador. El material de los eslabones es aluminio 6061. Aunque el robot es de 3 grados de libertad en este trabajo se utilizan 2 grados: el hombro y el codo. En la tabla 1 se indican las matrículas de los motores.

Tabla 1. Servomotores del robot.

Articulación	Matrícula	Resolución	Torque
Codo	DM-1004C-115	655360	4 *Nm*
Hombro	DM-1050-115	1024000	50 *Nm*
Base	DM-1015B60	655360	15 *Nm*

La adquisición de datos se realiza mediante la tarjeta LC228 con bus PCI. El procesador de la computadora accede a los recursos de la tarjeta mapeados en la memoria mediante un proyecto creado en Visual Studio C. En el proyecto se generan las subrutinas de adquisición de datos, envió de par, interrupciones, medidas de seguridad y almacenamiento de datos, teniendo un tiempo de muestreo de 2.5 milisegundos En la figura 2 se muestra el diagrama general de la planta experimental.

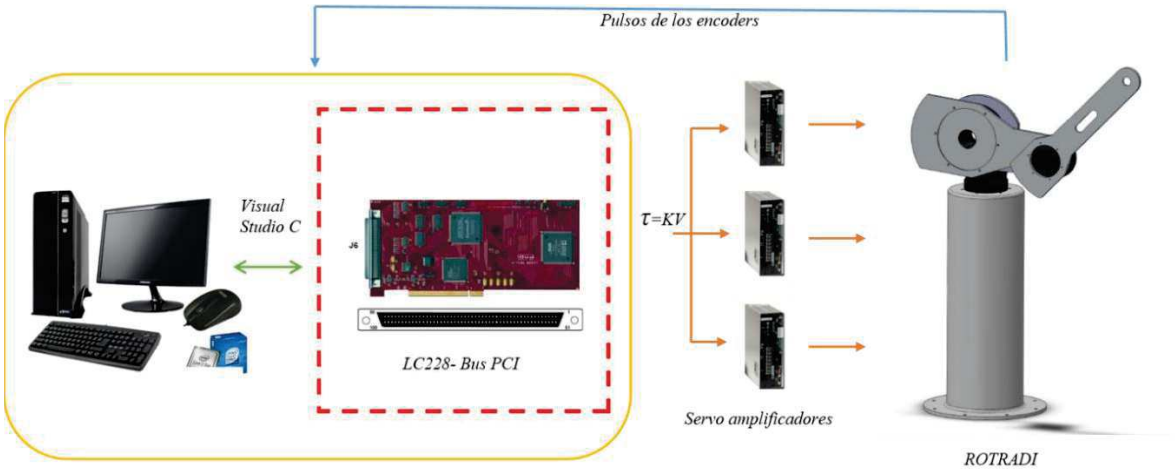


Figura 2. Diagrama general de la planta experimental.

2.1 Modelo dinámico

El modelo dinámico de un robot manipulador de 2 grados de libertad está determinado por la matriz de inercia, fuerzas centrípetas y de coriolis, par gravitacional y fricción. En la tabla 1 se presenta la nomenclatura usada.

Tabla 2. Parámetros del robot

Articulación	Descripción	Notación	Unidades
Hombro	Masa del eslabón 1	m_1	kg
	Longitud del eslabón 1	1_1	m
	Inercia del eslabón 1	I_1	$\mathrm{Nm\,seg^2/rad}$
	Centro de masa del eslabón 1	l_{c1}	m
	Coeficiente de fricción viscosa	b_1	Nm seg/rad
	Coeficiente de fricción de Coulomb	f_{c1}	Nm
Codo	Masa del eslabón 2	m_2	kg
	Longitud del eslabón 2	1_2	m
	Inercia del eslabón 2	I_2	$\mathrm{Nm\,seg^2/rad}$
	Centro de masa del eslabón 2	l_{c2}	m
	Coeficiente de fricción viscosa	b_2	Nm seg/rad
	Coeficiente de fricción de Coulomb	f_{c2}	Nm
	Aceleración debida a la gravedad	g	$\mathrm{Nm/seg^2}$

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 22, pp.279 - 290, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

El modelo dinámico del robot [5] está dado por la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix}\tau_1\\ \tau_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_{c2}^2 + 2m_2 l_1 l_{c2}\cos(q_2) + I_1 + I_2 & m_2 l_{c2}^2 + m_2 l_1 l_{c2}\cos(q_2) + I_2 \\ m_2 l_{c2}^2 + m_2 l_1 l_{c2}\cos(q_2) + I_2 & m_2 l_{c2}^2 + I_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{q}_1\\ \ddot{q}_2\end{bmatrix}$$

$$+\begin{bmatrix} -2m_2 l_1 l_{c2}\,\text{sen}(q_2)\,\dot{q}_2 & -m_2 l_1 l_{c2}\,\text{sen}(q_2)\,\dot{q}_2 \\ -m_2 l_1 l_{c2}\,\text{sen}(q_2)\,\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix}$$

$$+g\begin{bmatrix} l_{c1} m_1\,\text{sen}(q_1) + m_2 l_1\,\text{sen}(q_1) + m_2 l_{c2}\,\text{sen}(q_1+q_2) \\ m_2 l_{c2}\,\text{sen}(q_1+q_2)\end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & f_{c1} \\ f_{c2} & b_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix} \tag{1}$$

3. Algoritmo de mínimos cuadrados

El modelo dinámico de un robot manipulador de n grados de libertad presenta la propiedad de linealidad con respecto a los parámetros del robot, por lo que puede ser expresado como un regresor lineal.

$$\boldsymbol{y}(k) = \boldsymbol{\psi}(k)^T \boldsymbol{\theta} \tag{2}$$

donde $\boldsymbol{y}(k)$ es un vector de mediciones, $\boldsymbol{\psi}(k)$ es la matriz de regresión compuesta por observaciones de funciones conocidas y $\boldsymbol{\theta}$ el vector de parámetros desconocidos. Algoritmo de mínimos cuadrados: caso escalar y vectorial.

Caso escalar

$$\widehat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \widehat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \frac{P(k-1)\boldsymbol{\psi}(k)\boldsymbol{e}(k)}{1+\boldsymbol{\psi}(k)^T P(k-1)\boldsymbol{\psi}(k)} \tag{3}$$

$$P(k) = P(k-1) - \frac{P(k-1)\boldsymbol{\psi}(k)\boldsymbol{\psi}(k)^T P(k-1)}{1+\boldsymbol{\psi}(k)^T P(k-1)\boldsymbol{\psi}(k)} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{e}(k) = \boldsymbol{y}(k) - \boldsymbol{\psi}(k)^T \widehat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) \tag{5}$$

donde $\boldsymbol{y}(k)\,\mathbb{R}$ es un vector de mediciones, $\boldsymbol{\psi}(k) \in \mathbb{R}^{px1}$ es la matriz de regresión compuesta por observaciones de funciones conocidas, $P(k) \in \mathbb{R}^{pxp}$ es la matriz de covarianza, $\boldsymbol{e}(k) \in \mathbb{R}^n$ es el error de predicción paramétrica y $\widehat{\boldsymbol{\theta}}(k) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de estimación paramétrica.

Caso vectorial

$$\widehat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \widehat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + P(k-1)\boldsymbol{\psi}(k)[I + \boldsymbol{\psi}(k)^T P(k-1)\,\boldsymbol{\psi}(k)]^{-1}\boldsymbol{e}(k) \tag{6}$$

$$P(k) = P(k-1) - P(k-1)\boldsymbol{\psi}(k)[I + \boldsymbol{\psi}(k)^T P(k-1)\,\boldsymbol{\psi}(k)]^{-1}\boldsymbol{\psi}(k)^T P(k-1) \tag{7}$$

$$\boldsymbol{e}(k) = \boldsymbol{y}(k) - \boldsymbol{\psi}(k)^T \widehat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) \tag{8}$$

Tomando en cuenta que $I \in \mathbb{R}^{nxn}$ es la matriz identidad, $\boldsymbol{y}(k) \in \mathbb{R}^n$ es un vector de mediciones del sistema, $\boldsymbol{\psi}(k) \in \mathbb{R}^{pxn}$ es la matriz de regresión compuesta por observaciones, $P(k) \in \mathbb{R}^{pxp}$ es la matriz de covarianza, $\boldsymbol{e}(k) \in \mathbb{R}^n$ es el error de predicción paramétrica y $\widehat{\boldsymbol{\theta}}(k) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de estimación paramétrica [5].

En este trabajo se utiliza el caso escalar debido a que el modelo de regresión es el modelo de energía, sin embargo, en caso de elegir otro modelo de regresión, podría ser necesario utilizar el caso vectorial.

4. Modelo de energía

El teorema de energía establece que la energía mecánica total aplicada al robot es igual a la suma de energía cinética y la energía potencial de un sistema [1].

$$\int_0^t \boldsymbol{q}^T(\sigma)\boldsymbol{\tau}(\sigma)\,d\sigma = \mathcal{K}\big(\boldsymbol{q}(\sigma),\dot{\boldsymbol{q}}(\sigma)\big) + \mathcal{U}\big(\boldsymbol{q}(\sigma)\big) + \int_0^t \dot{\boldsymbol{q}}^T(s)\mathcal{B}\dot{\boldsymbol{q}}(s) + \int_0^t |\dot{\boldsymbol{q}}(s)|\,ds \tag{9}$$

donde

$$\mathcal{K}\big(\boldsymbol{q}(\sigma),\dot{\boldsymbol{q}}(\sigma)\big) = \tfrac{1}{2}\dot{\boldsymbol{q}}^T(\sigma)M\big(\boldsymbol{q}(\sigma)\big)\dot{\boldsymbol{q}}(\sigma) \tag{10}$$

$$\boldsymbol{g}\big(\boldsymbol{q}(\sigma)\big) = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{q}}\mathcal{U}(\boldsymbol{q}(\sigma)) \tag{11}$$

La estructura del regresor debe cumplir la condición de linealidad en los parámetros, es decir que pueda ser expresado como un regresor lineal manteniendo la estructura de una matriz de observaciones o mediciones y un vector de parámetros. Considerando las ecuaciónes (9), (10) y (11) el modelo de energía de un robot de 2 grados de libertad es el siguiente.

$$\int_0^t [\tau_1 \quad \tau_2]\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix} dt = \frac{1}{2}\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix}^T \begin{bmatrix}\theta_1 + 2\theta_2\cos(q_2) & \theta_3 + \theta_2\cos(q_2)\\ \theta_3 + \theta_2\cos(q_2) & \theta_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix}$$

$$+\begin{bmatrix}\theta_4[1-\cos(q_1)] + \theta_5[1-\cos(q_1+q_2)]\\ \theta_5[1-\cos(q_1+q_2)]\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\theta_6\int_0^t \dot{q}_1^2 dt + \theta_8\int_0^t|\dot{q}_1|dt\\ \theta_7\int_0^t \dot{q}_2^2 dt + \theta_9\int_0^t|\dot{q}_2|dt\end{bmatrix} \tag{12}$$

Este modelo tiene la ventaja de no utilizar la aceleración articular, otra ventaja es al ser un modelo de regresión escalar es más rápida la estimación. El error de predicción del modelo de regresión de la energía se muestra en la ecuación (13) [5].

$$e(k) = \int_0^t [\tau_1\dot{q}_1 + \tau_2\dot{q}_2]\,dt - \boldsymbol{\psi}(k)\,\widehat{\boldsymbol{\theta}}(k) \tag{13}$$

Los componentes del vector $\widehat{\boldsymbol{\theta}}$ son:

$$\begin{aligned}
\theta_1 &= m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_{c2}^2 + I_1 + I_2\\
\theta_2 &= l_1 m_2 l_{c2}\\
\theta_3 &= m_2 l_{c2}^2 + I_2\\
\theta_4 &= g(l_{c1}m_1 + m_2 l_1)\\
\theta_5 &= g m_2 l_{c2}\\
\theta_6 &= b_1\\
\theta_7 &= f_{c1}\\
\theta_8 &= b_2\\
\theta_9 &= f_{c2}
\end{aligned} \tag{14}$$

Y los componentes del vector de regresión $\boldsymbol{\psi}$ son:

$$\begin{aligned}
\psi_{11} &= \frac{1}{2}\dot{q}_1^2 \\
\psi_{12} &= \cos(q_2)\,\dot{q}_1(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\
\psi_{13} &= \dot{q}_2\left[\frac{1}{2}\dot{q}_2 + \dot{q}_1\right] \\
\psi_{14} &= 1 - cos(q_1) \\
\psi_{15} &= 1 - cos(q_1 + q_2) \\
\psi_{16} &= \int_0^t \dot{q}_1^2\, dt \\
\psi_{17} &= \int_0^t \dot{q}_2^2\, dt \\
\psi_{18} &= \int_0^t |\dot{q}_1|\, dt \\
\psi_{19} &= \int_0^t |\dot{q}_2|\, dt
\end{aligned} \tag{15}$$

5. Resultados

El robot de esta planta experimental es de 3 grados de libertad, sin embargo, en este trabajo se implementa la identificación de 2 grados de libertad, la del hombro y del codo. Se propone mover algunas articulaciones, mientras se bloquean otras, esta técnica puede simplificar las ecuaciones de identificación.

Figura 4. Planta experimental del laboratorio de Robótica y control de la BUAP.

5.1 Robot péndulo

Bloqueando la base y el hombro se puede empezar estimando los parámetros del último eslabón. Inicialmente el codo se toma como un péndulo, se genera el modelo dinámico y se coloca como un regresor lineal. El error de estimación paramétrica

$$e(k) = \int_0^t \dot{q}(\sigma)\tau(\sigma)dt - \boldsymbol{\psi}(k)\,\widehat{\boldsymbol{\theta}}(k) \tag{18}$$

Los componentes del vector $\widehat{\boldsymbol{\theta}}$ son:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= I_p \\ \theta_2 &= g\mathrm{m}l_c \\ \theta_3 &= b \\ \theta_4 &\quad f_c \end{aligned} \tag{19}$$

Y los componentes del vector de regresión $\boldsymbol{\psi}$ son:

$$\begin{aligned} \psi_{11} &= \frac{1}{2}\dot{q}^2 \\ \psi_{12} &= 1 - cos(q) \\ \psi_{13} &= \int_0^t \dot{q}^2\,dt \\ \psi_{14} &= \int_0^t |\dot{q}|\,dt \end{aligned} \tag{20}$$

Se deduce la señal de excitación persistente, la amplitud de esta señal busca no saturar el torque máximo del codo.

$$\tau = sen(9\pi t - 0.2) + 0.8sen(2.5\pi t - 0.34).66 + [1 - e^{-1.8t}]0.55 \tag{21}$$

Con el programa principal se almacenan los datos y se introducen en un programa desarrollado en MATLAB que devuelve el vector $\widehat{\boldsymbol{\theta}}$. Se puede notar que los resultados son cercanos debido a que al simular la dinámica del robot la posición y la velocidad articular son similares a los resultados obtenidos experimentalmente.

Tabla 3. Vector $\widehat{\boldsymbol{\theta}}$ del péndulo.

$\boldsymbol{\theta}$	Valor
$\boldsymbol{\theta_1}$	0.0080
$\boldsymbol{\theta_2}$	0.9012
$\boldsymbol{\theta_3}$	0.6484
$\boldsymbol{\theta_4}$	0.0300

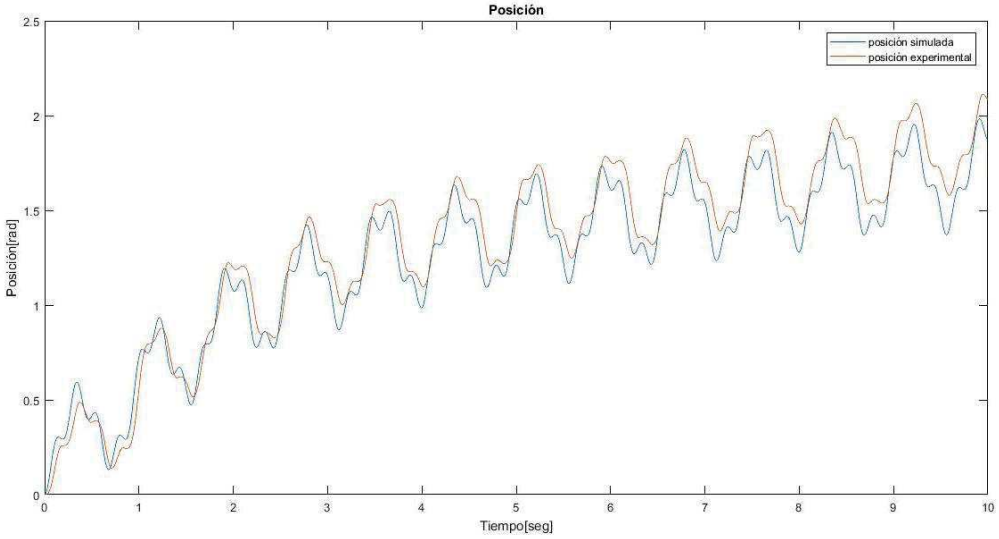


Figura 4. Posición articular del codo experimental

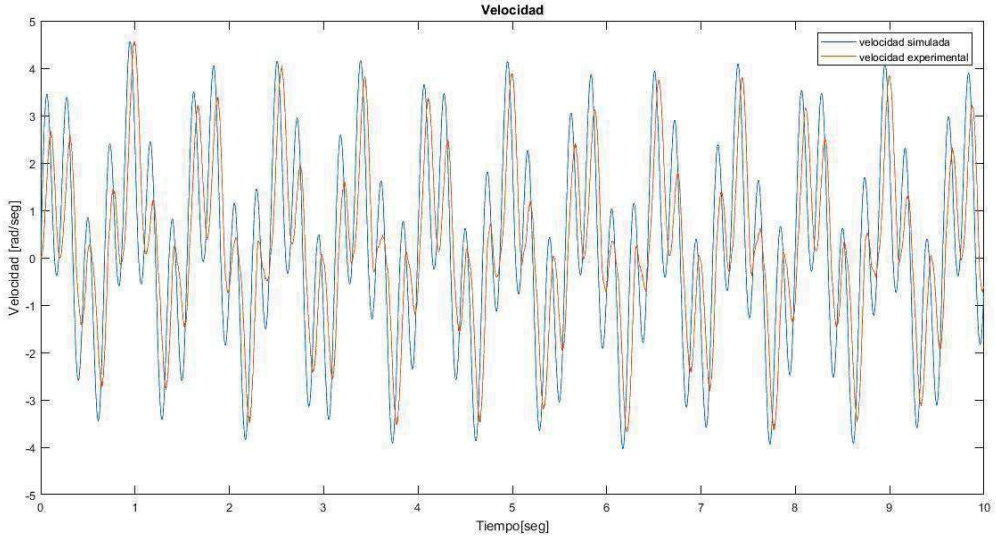


Figura 5. Velocidad articular del codo experimental

5.2 Robot de 2 grados de libertad

Después se implementa el modelo de 2 grados de libertad, la base se encuentra inmóvil y se estiman los parámetros del hombro, se consideran valores obtenidos en el codo. El error de estimación y el modelo de regresión de energía se encuentra en las ecuaciones (12) y (13). La señal de excitación persistente para el codo y hombro se presentan en las siguientes expresiones.

$$\tau_1 = 15sen(9\pi t - 0.1) + 5sen(6\pi t - 0.34) + [1 - e^{-1.8t}]7.0 \quad (22)$$

$$\tau_2 = 1.4sen(9\pi t - 0.2) + 0.9sen(2.5\pi t - 0.34) + [1 - e^{-1.8t}]0.6 \quad (23)$$

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 22, pp.279 - 290, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Se utilizan los valores de la parametrización anterior para fijar algunos valores y se almacenan los datos. En MATLAB se estima el vector $\widehat{\boldsymbol{\theta}}$, para el codo no se fijaron las fricciones, ya que cambiaron al ser un péndulo doble.

En la figura 6 se presentan las gráficas obtenidas de los valores obtenidos del vector de estimación paramétrica.

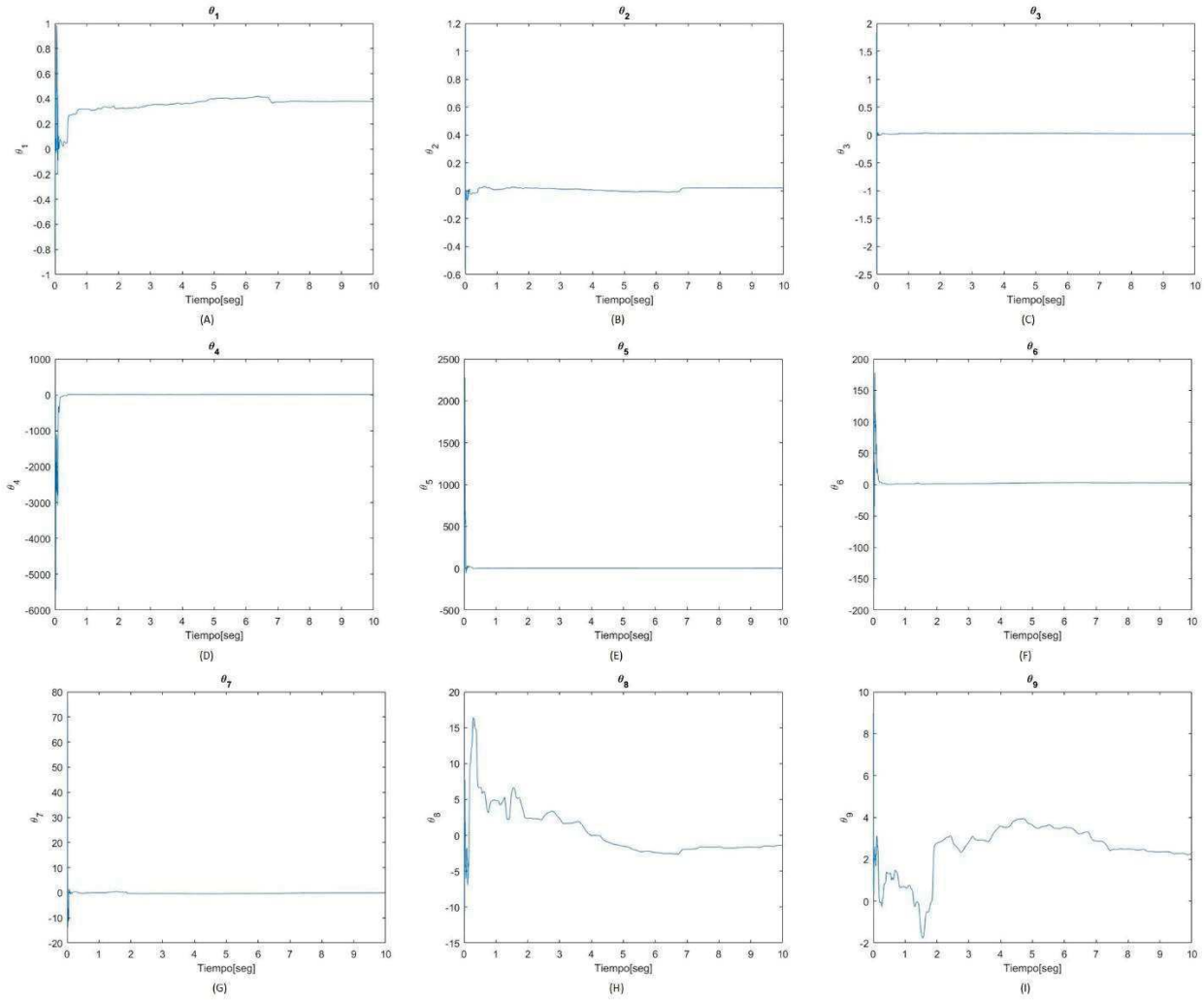


Figura 6. Gráficas del vector de parámetros estimados. (A)θ_1, (B)θ_2, (C)θ_3, (D)θ_4, (E)θ_5, (F)θ_6, (G)θ_7, (H)θ_8 y (I)θ_1

En la tabla 2 se presentan los valores obtenidos.

Tabla 4. Parámetros del robot manipulador de 2 grados de libertad.

$\boldsymbol{\theta}$	Valor
$\boldsymbol{\theta_1}$	0.3779
$\boldsymbol{\theta_2}$	0.0203
$\boldsymbol{\theta_3}$	0.0216
$\boldsymbol{\theta_4}$	7.6919
$\boldsymbol{\theta_5}$	0.0698
$\boldsymbol{\theta_6}$	2.2806
$\boldsymbol{\theta_7}$	7.9911
$\boldsymbol{\theta_8}$	0.63719
$\boldsymbol{\theta_9}$	0.16

En las gráficas 7-10 se puede notar que los parámetros simulados con ODE45 devuelven la posición y velocidad obtenida del hombro en el experimento, esto indica que los parámetros referentes al hombro son adecuados. No obstante, en la comparación de la posición y velocidad del codo, cuando se colocan los parámetros encontrados por el experimento en la simulación, esta devuelve una posición parecida en forma del experimento, con una mayor amplitud y con una pequeña deriva, aunque en la simulación no se tomaron en cuenta las fricciones obtenidas en la simulación del péndulo, es así, que las fricciones se volvieron a estimar, pero esto solo mejoro un poco la deriva. La grafica de la figura 10 muestra que la velocidad tiene la misma forma, pero una amplitud diferente.

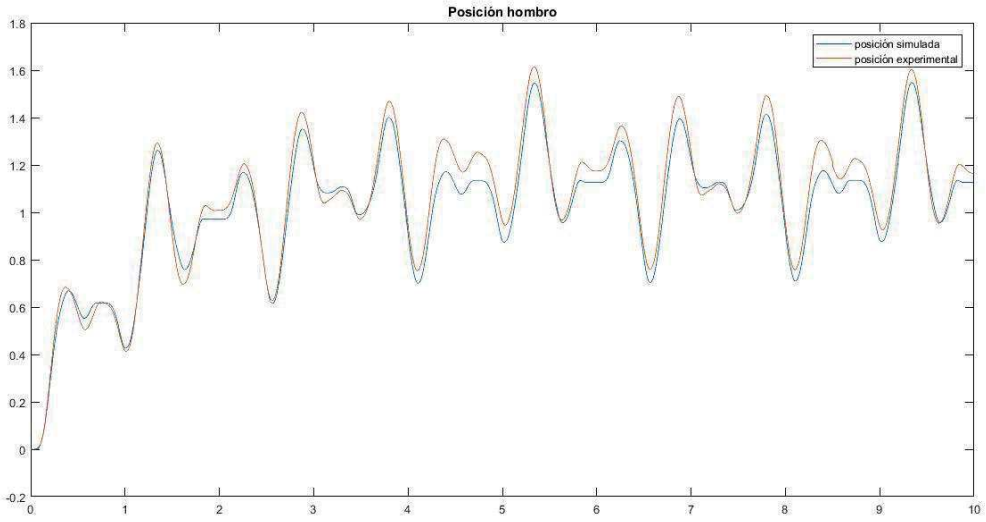


Figura 7. Posición articular del hombro experimental

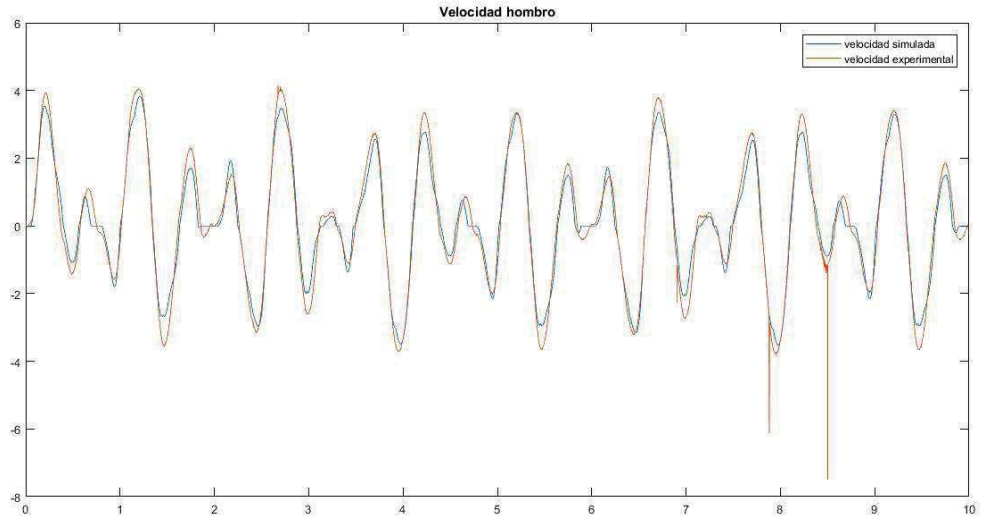


Figura 8. Velocidad articular del hombro experimental

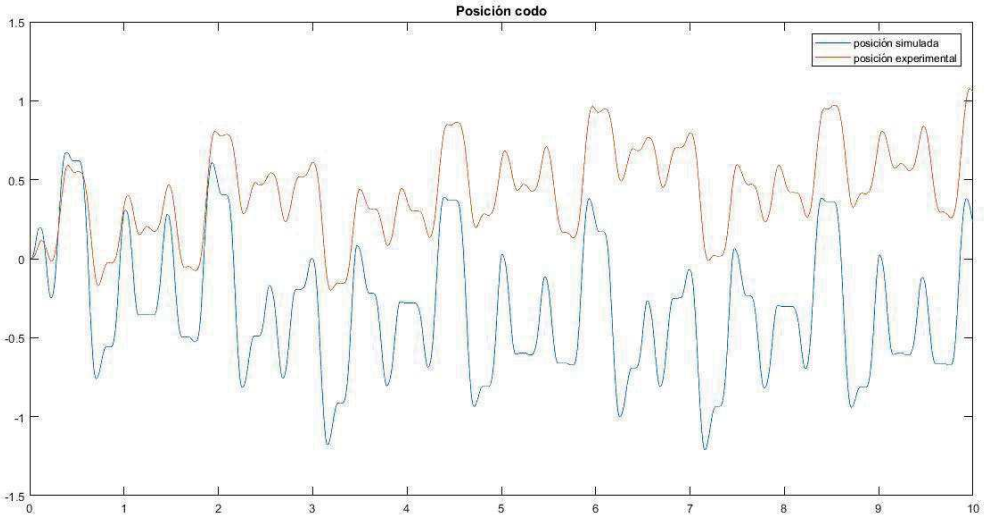


Figura 9. Posición articular del codo experimental

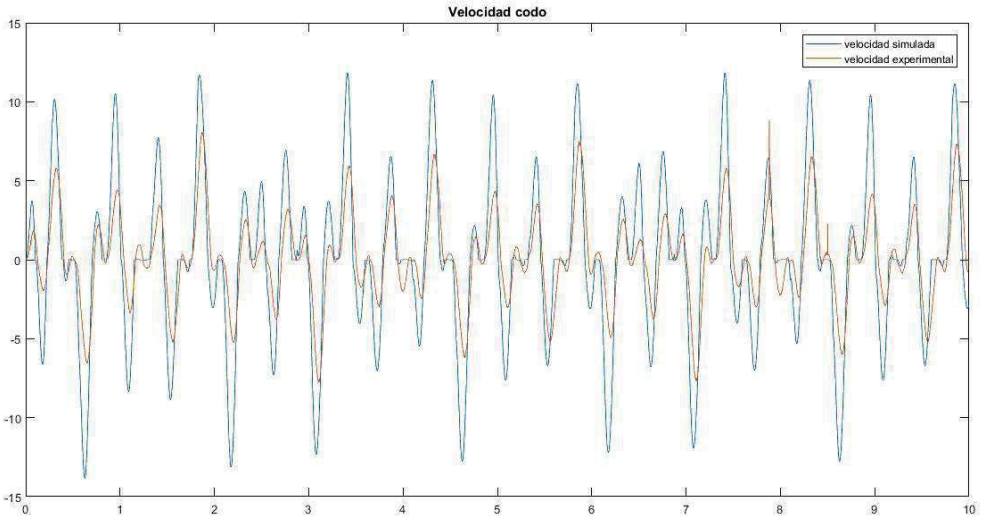


Figura 10. Velocidad articular del codo experimental

Conclusiones

En este trabajo se logró la implementación del proceso de identificación paramétrica de un robot manipulador de 2 grados de libertad utilizando el modelo de regresión de energía. Este regresor representa ventajas debido a que la posición articular se obtiene mediante los encoders y no cuenta tacómetros para medir la velocidad, sin embargo, la velocidad es calculada mediante la diferenciación numérica de Euler, otra ventaja de este modelo es que consume menos tiempo computacional ya que no requiere calcular la aceleración y calcula un vector de parámetros y no una matriz. En cuanto al proceso de selección para la señal de excitación persistente, se basó en la literatura donde ocupa señales multisenoidales y la selección de los coeficientes se encontraron empíricamente.
La metodología expuesta en este trabajo propone realizar la parametrización de manera escalada, esto se considera de ayuda cuando no se tiene experiencia con la planta. Los resultados presentados son buenos considerando que no se consideran otros fenómenos en la simulación como ganancias de amplificadores y fricción estática. Como trabajo futuro se plantea realizar la parametrización de los 3 grados de libertad del robot manipulador.

Referencias

[1] Khalil W. y Dombre E., *"Modelling, Identification and Control of Robots"*, Ed. Kogan Page Science, Londres, 2002.
[2] Kozlowski K. *"Modelling and Identification in Robotics."*, Ed. Springer-Verlag, Londres ,1988.
[3] Reyes F. y Kelly R. *"Experimental Evaluation of Identification schemes on Direct Drive Robot"*, Robótica, pp 563-571, Ft. Lauderdale, FL, 1985.
[4] An C., Atkerson C. y Hollerbach J. *"Estimation of inertial parameters of rigid body links of manipulators"*, 24th Conference on Decision and Control, pp 900-995, Reino Unido, 1997.
[5] Reyes F. *"Robótica. Control de robots manipuladores"*, Alfaomega, México, Primera Edición, 2011.
[6] Reyes F. *"Matlab. Aplicado a robótica y mecatrónica"*, Alfaomega, México, Primera Edición, 2012.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 23, pp.291 - 302, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Programación y Simulación de un Autómata para un Sistema de Transporte de Moldes de Arena

Zarate Sampedro Oscar, Ordoñez Flores Rafael, Bedolla Hernández Jorge, Díaz Domínguez Judith y García Martínez Luis Manuel

División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Apizaco, Av. Instituto Tecnológico s/n, C.P. 90300, Apizaco, Tlaxcala, México.

ing.oscarzs@hotmail.com

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo responder a las necesidades específicas de la Empresa Metalúrgica Artesanal S.A de C.V, proponiendo una alternativa de solución basada en la tecnología de automatización industrial con el fin de mejorar la eficiencia del proceso de transporte de moldes de arena para el llenado de fundición de aluminio para ello el objetivo es realizar la programación de un PLC, así como la interfaz para el monitoreo del sistema de transporte de moldes de arena en la empresa Metalúrgica Artesanal S.A de C.V, para el correcto funcionamiento de los actuadores del sistema, así como la sincronización de tiempos y control automático de los dispositivos. Los actuales estándares de manufactura requieren soluciones tecnológicas robustas que permitan garantizar un adecuado flujo de operaciones dentro de las empresas, optimizando la productividad y minimizando la mano de obra. Metalúrgica Artesanal S.A de C.V consciente de estos nuevos paradigmas, enfoca su estrategia tecnológica en la inversión de recursos para la automatización de sus procesos.

Palabras clave: Automatización, Programación, PLC, Interfaz, Monitoreo, Sistema.

1. Introducción

Para que el sistema de control se encargue de la toma de decisiones ante determinados comportamientos de la planta, hablándose entonces de sistemas automáticos de control. Para ello se requiere la existencia de sensores que detecten el comportamiento de dicha planta y de unas interfaces para adaptar las señales de los sensores a la entrada del sistema de control. El diagrama de bloques será como el de la figura 1.

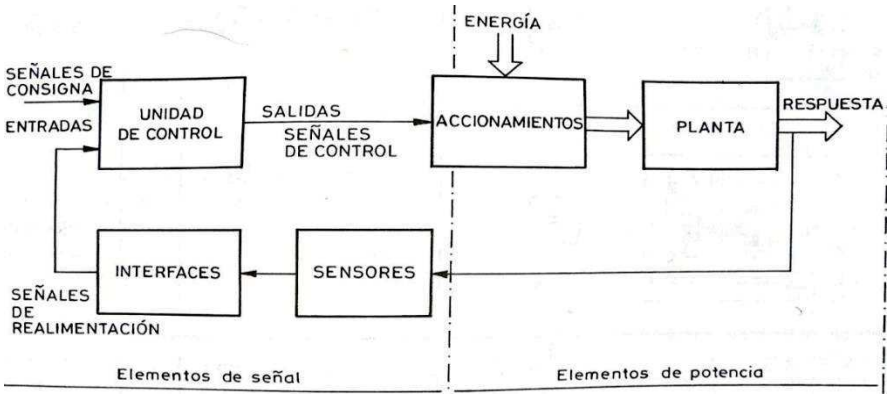
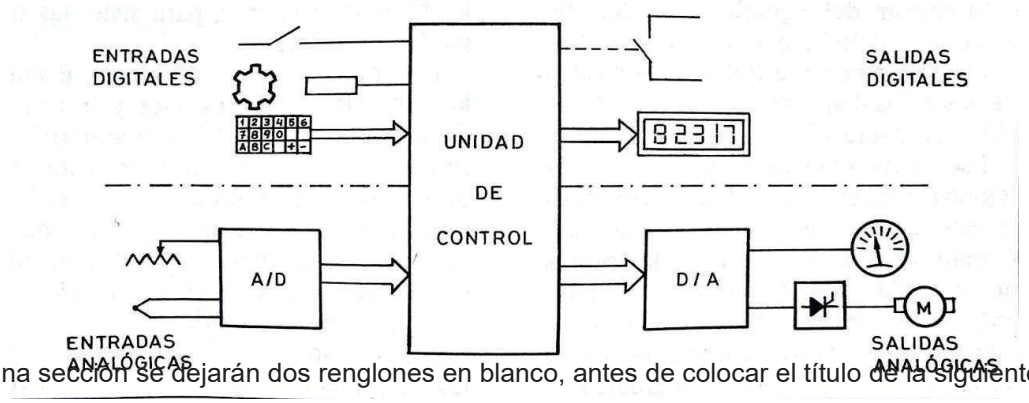


Figura 1. Sistema de control en lazo cerrado.

Este tipo de sistemas se denominan en lazo cerrado, ya que su diagrama muestra claramente una estructura con una cadena directa y un retorno o retroalimentación, formando un lazo de control. Así en el caso general, podremos dividir el sistema de control en los siguientes bloques;

- Unidad de control.
- Accionamientos.
- Sensores.
- Interfaces.

Cabe indicar aquí que el papel del autómata programable dentro del sistema de control es el de unidad de control, aunque suele incluir también, totalmente o en parte, las interfaces con las señales de proceso. Al conjunto de señales de consigna y de realimentación que entran a la unidad de control se les denomina genéricamente entradas y al conjunto de señales de control obtenidas salidas como se muestra en la figura 2.



na sección se dejarán dos renglones en blanco, antes de colocar el título de la siguiente sección.

Figura 2. Señales de E/S de la unidad de control.

Muchos sistemas automatizados en el sector industrial nacional e internacional se manipulan a través de un equipo llamado Controlador Lógico Programable (PLC), que permite modificar un sistema de control sin tener que volver a alambrar las conexiones de los dispositivos, son robustos y están diseñados para resistir vibraciones, temperaturas, humedad y ruido. Estos dispositivos también tienen la ventaja de ser muy sencilla la programación en escalera, así como el entendimiento de sus cinco lenguajes de programación que implementan, el cual se basa en operaciones de lógica y conmutación. [1]

Metalúrgica Artesanal S.A de C.V es una empresa dedicada a la fabricación de piezas de aluminio, cerámica, madera, vidrio entre otros materiales, dando como resultado piezas de iluminación o decoración. En años recientes la empresa ha invertido en Investigación Desarrollo e Innovación (I+D+I) formando un Departamento de Ingeniería que se encarga de desarrollar de manera permanente nuevas propuestas para optimizar recursos e incrementar la calidad de sus productos. Entre las soluciones establecidas para incrementar la capacidad de producción se adquirió un equipo automático para la elaboración de moldes de arena. Sin embargo, este dispositivo aún no se encuentra operando al total de su capacidad nominal, dado que las operaciones de transporte y vertido de material aún se realizan de forma manual.

Conservar la línea de producción con estas características, incrementa la probabilidad de ocurrencia de accidentes, pues se trabaja con aluminio fundido a 650 °C. De acuerdo a lo anterior, se propone un sistema automatizado con un autómata programable para transportar adobes, que permita crear un circuito cerrado que contemple las actividades principales de la línea: recepción del molde de arena, llenado de los moldes con el vertido en turno, enfriamiento del vertido hasta su solidificación, retirada del molde y regreso de las bases de los moldes al punto de recepción. El proyecto tiene como objetivo responder a las necesidades de la empresa Metalúrgica Artesanal S.A de C.V proponiendo

alternativas de solución basadas en las tecnologías emergentes de automatización, con el fin de mejorar la eficiencia del proceso y hacerlo menos riesgoso.

2. Desarrollo

El principio USA que en un inicio se utilizó para la planificación de los recursos de la empresa, es una metodología común a los proyectos de automatización [9]. Con base a este principio se elaboró una propuesta de automatización que corresponda a las necesidades planteadas por la empresa. Actualmente este proyecto se encuentra en la fase de automatizar el proceso, pues si bien el proceso es semiautomático, no existe claridad en los métodos de trabajo que se tienen. Finalmente. Para ello se particularizan las acciones para lograr el resultado esperado.

2.1 Metodología utilizada

Los pasos por seguir para aplicar la metodología de automatizar el proceso son; requerimientos del cliente, descripción del sistema a automatizar, listado de señales, selección del autómata programable, descripción de los equipos del sistema y programación del PLC

2.1.1 Requerimientos del cliente

Se realizó la estandarización del proceso actual a partir de un estudio de métodos del sistema de producción con el objetivo de tener un punto de comparación y proponer una solución que permitiera incrementar los datos de productividad de la línea. Como resultado se obtuvieron los diagramas de operaciones, de recorrido, así como los tiempos de cada operación, para definir parámetros del nuevo sistema automático como: velocidad de los sistemas de transporte, velocidad de los actuadores, entre otros. Se buscó migrar el flujo de moldes hacia un circuito cerrado que permita una mejor interacción de las operaciones para agilizar el proceso y disminuir los riesgos a la salud. En la figura 3, se expone el esquema del nuevo sistema de producción. Se propone un sistema mecatrónico de cilindros, bandas y cadenas, que soporte adecuadamente el peso de los moldes, con una capacidad de hasta 18 adobes cada uno.

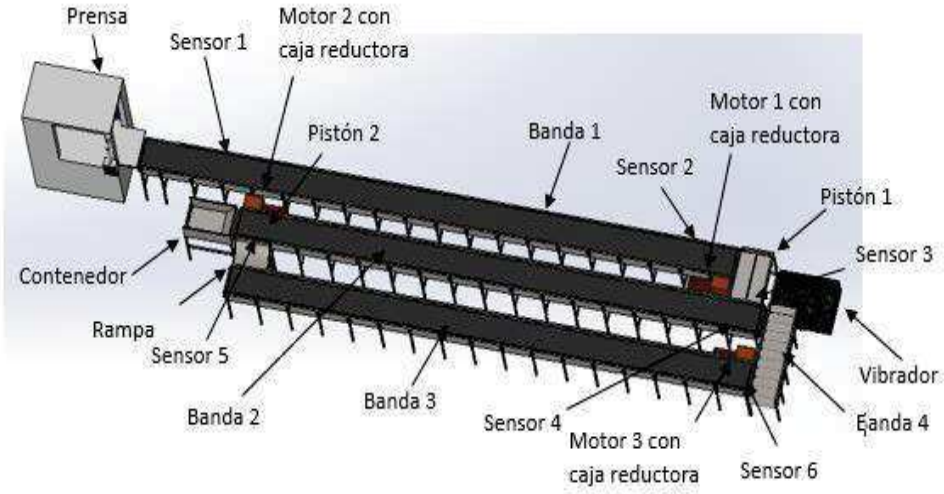


Figura 3. Componentes eléctricos y electrónicos del sistema

2.1.2 Descripción del Sistema

Dentro del área de fundición de la empresa metalúrgica artesanal S.A de C.V se diseñó el sistema de transporte de moldes de arena, para hacer lo menos posible cambios en el área, debido a que se tienen maquinas ya instaladas difíciles de mover o cambiar de lugar, para ello se adecuo el diseño para contemplar estas limitantes, además se tiene en cuenta la temperatura dentro del área de fundición ya que es 32° C, así como el ambiente que es de mucho polvo debido a los moldes de

arena, como se muestra en la figura 4, se observa la distribución de actuadores eléctricos, electrónico y actuadores neumáticos, también tuberías y ductos para el cableado eléctrico.

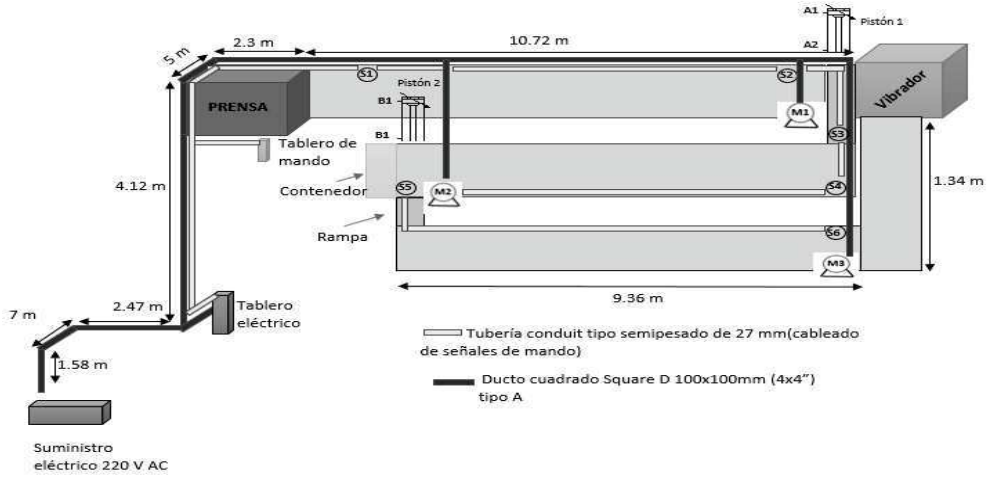


Figura 4. Actuadores, tuberías y ductos para el cableado

2.1.3 Listado de señales

Una vez propuesto el sistema de automatización para el transporte de moldes de arena, se identificó las señales de entrada y de salida de sensores y actuadores que se involucran en la automatización. En la tabla 1, se muestra el número de salidas que tendrá el PLC, para ello son salidas digitales, el cual activan a los actuadores eléctricos, electrónicos, y neumáticos.

Tabla 1. Entrada de variables

BYTE	ENTRADAS	ETIQUETAS	NOMBRE COMPLETO
0	I0.0	B.P.SISTEMA	BOTON DE PARO DE TODO EL SISTEMA
0	I0.1	B.A.SISTEMA	BOTON DE ARRANQUE DE TODO EL SISTEMA
0	I0.2	B.A.M1	BOTON DE ARRANQUE DEL MOTOR 1
0	I0.3	B.P.M1	BOTON DE PARO DEL MOTOR 1
0	I0.4	B.A.M2	BOTON DE ARRANQUE DEL MOTOR 2
0	I0.5	B.P.M2	BOTON DE PARO DEL MOTOR 2
0	I0.6	B.A.M3	BOTON DE ARRANQUE DEL MOTOR 3
0	I0.7	B.P.M3	BOTON DE PARO DEL MOTOR 3
1	I1.0	A0	SENSOR DE POSICION DE RETROCESO PISTON 1
1	I1.1	A1	SENSOR DE POSICION DE AVANCE PISTON 1
1	I1.2	B1	SENSOR DE POSICION DE RETROCESO PISTON 2
1	I1.3	B2	SENSOR DE POSICION DE AVANCE PISTON 2
1	I1.4	S1.B1	SENSOR 1 EN LA BANDA 1
1	I1.5	S2.B1	SENSOR 2 EN LA BANDA 1
1	I1.6	S3.PLT	SENSOR 3 EN LA PLATAFORMA
1	I1.7	S4.B2	SENSOR 4 EN LA BANDA 2
2	I2.0	S5.B2	SENSOR 5 EN LA BANDA 2
2	I2.1	S6.B3	SENSOR 6 EN LA BANDA 3

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 23, pp.291 - 302, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

En la tabla 2 se muestran las variables de salida para la activación de los actuadores, lámparas indicadoras, motores eléctricos, etc.

Tabla 2. Salida de variables

BYTE	SALIDAS	ETIQUETAS	NOMBRE COMPLETO
0	Q0.0	SYSTEM.STOP	INDICADOR DE SISTEMA DETENIDO
0	Q0.1	SYSTEM.START	INDICADOR DE SISTEMA EN FUNCIONAMIENTO
0	Q0.2	M1.START	INDICADOR DE MOTOR 1 EN FUNCIONAMIENTO
0	Q0.3	M2.START	INDICADOR DE MOTOR 2 EN FUNCIONAMIENTO
0	Q0.4	M3.START	INDICADOR DE MOTOR 3 EN FUNCIONAMIENTO
0	Q0.5	M1.STOP	INDICADOR DE MOTOR 1 DETENIDO
0	Q0.6	M2.STOP	INDICADOR DE MOTOR 2 DETENIDO
0	Q0.7	M3.STOP	INDICADOR DE MOTOR 3 DETENIDO
1	Q1.0	MOTOR.1	SALIDA A MOTOR 1
1	Q1.1	MOTOR.2	SALIDA A MOTOR 2
1	Q1.2	MOTOR.3	SALIDA A MOTOR 3
1	Q1.3	EV1	SALIDA A ELECTROVALVULA 1
1	Q1.4	EV2	SALIDA A ELECTROVALVULA 2

2.1.4 Selección del autómata programable.

La selección del autómata programable en este caso el PLC (Controlador Lógico Programable) se seleccionó con base al número de entradas a ocupar para el proceso y el número de salidas para la activación de actuadores, también al tipo de comunicación que se requiere para estar monitoreando el proceso por una pantalla HMI. En la figura 5 se observa el PLC que se utilizó para la programación es un PLC S7300 CPU 314C-2PN/DP, con 24 entradas digitales, 16 salidas digitales, 4 entradas analógicas y 2 salidas analógicas, con una fuente de alimentación de 220 V AC de salida a 24 V CD, este tipo de PLC es expandible en sus salidas y entradas, cuenta con comunicación Profibus DP, Profinet compatible a Ethernet, orientándonos a la industria 4.0 al internet de las cosas, para el monitoreo del sistema de transporte de moldes de arena

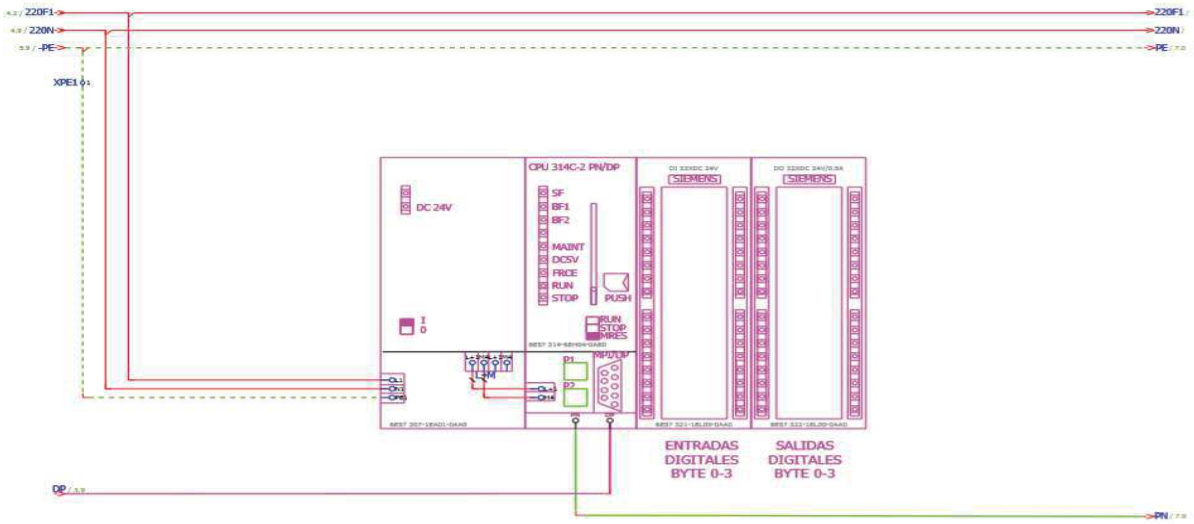


Figura 5. PLC S7300 CPU 314C-2PN/DP

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 23, pp.291 - 302, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Para realizar la interfaz para el monitoreo del sistema de transporte de moldes se seleccionó una pantalla HMI SIMATIC, KTP 900 BASIC, con interfaz o comunicación Profinet, pantalla de 9” táctil. En la figura 6 se muestra la pantalla que se seleccionó.

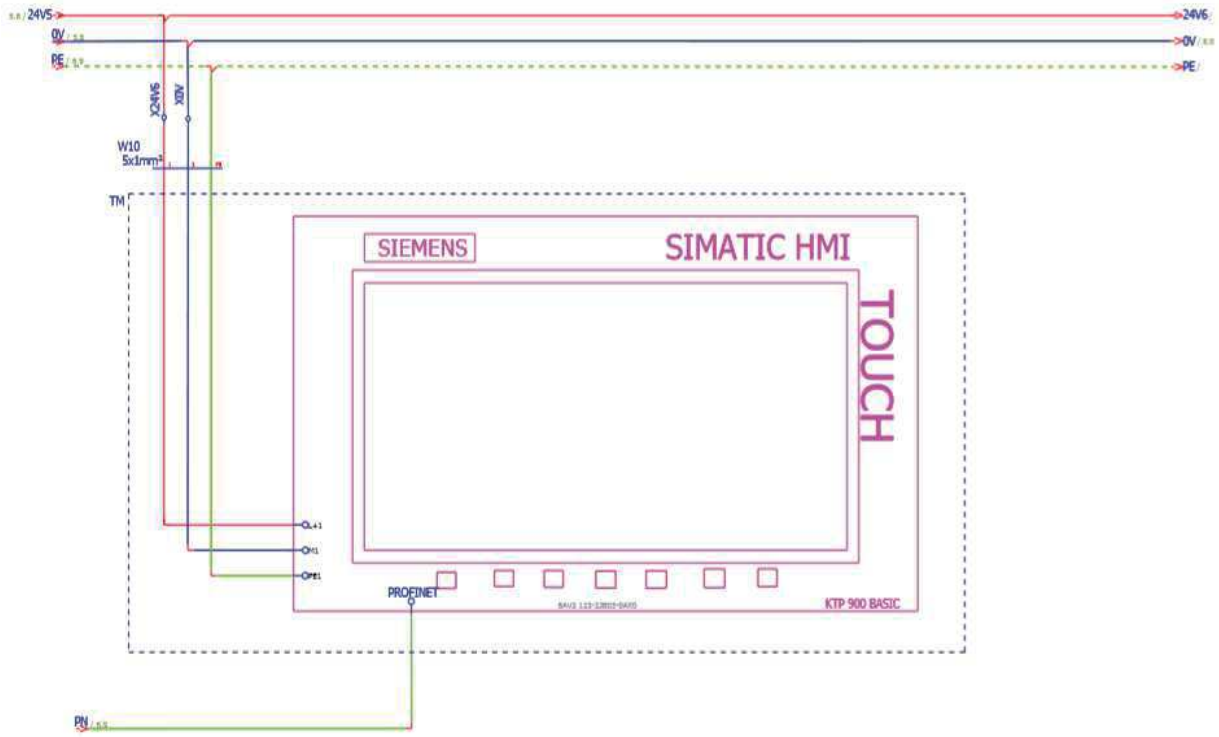


Figura 6. Pantalla HMI KTP 900 BASIC

2.1.5 Descripción de los equipos del sistema

Para implementar la propuesta de automatización planteada, se propone el control de cada banda transportadora a partir de un control escalar (voltaje-frecuencia) para regular la velocidad del motor conforme aumenta la frecuencia del voltaje de alimentación. Con ello, se evitarán los picos de corriente para el arranque de cada motor, utilizando un arranque tipo rampa en el variador de velocidad MICROMASTER 440. En este dispositivo, se puede aplicar esta técnica de control ajustando el parámetro P1300, donde se halla la forma estándar de la característica V/F lineal y FCC Flux Current Control) programable. Con ayuda de otros dispositivos como sensores, actuadores eléctricos, actuadores neumáticos, PLC siemens CPU314-2C PN/DP e incluso una pantalla HMI KTP900 Basic, se puede realizar la monitorización y el control del sistema automatizado para el transporte de moldes de arena.

Se realizó una selección de materiales considerando las características eléctricas y neumáticas de los dispositivos, así como, las características propias del proceso y la robustez de cada uno de ellos, ya que se tienen; interruptores mecánicos de límites (3SE5232-0HR01), motores eléctricos asíncronos trifásicos de AC de 5hp de potencia y alimentación a 220V AC a 1800 rpm, variadores de velocidad Micromaster 440 siemens de alimentación trifásica 220 V AC / 440 V AC, cable tipo Olflex calibre 10 y 12, elementos de accesorios como clemas, bornes, gabinete de control, riel DIN, botones de paro de emergencia tipo hongo, lámparas indicadoras, electroválvulas 4/2 con retorno de muelle, pistones neumáticos serie DIN-50-800-PPV-A, entre otros. En la tabla 3 se muestra la cotización del material, el cual se llega a un costo de material para la automatización del sistema con un valor de $426,283.75.

Tabla 3. Cotización de material a utilizar

Cantidad	Nombre del material	Caracteristicas	No. De serie	Precio unitario $	Costo total $
6	Valvula de estrangulacion y antirretorno	Para diametro de embolo; 50mm-----Conexión rosca; G 1/8 ----- Conexión diametro exterior; 6mm --------Caudal nominal; 185 l/min	GRLA-1/8-QS-6-D	$1,035.00	$6,210.00
3	Electrovalvulas 4/2 con retorno de muelle		VQ7-6-FHG-D-3Z	$5,021.66	$15,064.98
3	Piston Neumatico de doble efecto	Cilindro normalizado de doble efecto, diametro del embolo; 50mm-----Longitud de carrera;800mm	DIN-50-800-PPV-A	$6,900.00	$20,700.00
1	Unidad de mantenimiento			$5,175.00	$5,175.00
50	Tubo flexible 6mm			$21.85	$1,092.50
3	Silenciadores para racor			$122.66	$367.98
6	Detectores de proximidad SME/SMT y cables NEBU	Detector de posicion, magnetorresistivo, para ranura en T, montaje desde la parte superior. Alimentacion de 24 VDC, longitud de cable 2.5 m, extremo abierto.	SMT-8M-PS-24V-K-2.5-OE	$1,903.42	$11,420.54
3	Motor trifasico jaula de ardilla	Potencia; 5hp-----1800Rpm-----Voltaje; 220V/440V----- Armazon NEMA 184T	1LA01844FE21	$16,434.89	$49,484.66
9	Interruptores de limite	Tipo variable flexible con resorte	3SE5232-0HR01	$809.13	$7,282.16
1	PLC Siemens S7300	CPU314-2C PN/DP	6ES7 314-6EH04-0AB0	$16,632.83	$16,632.83
1	Modulo de señal; entrada/salidas digitales	SM1223 Modulo de señal de 16 DI a 24VDC/ 16DO tipo rele	6ES7223-1PL32-0XB0	$12,470.13	$12,470.13
1	Memory Card	SIMATIC Memory Card 24 MB	6ES7954-8LF02-0AA	$12,526.55	$12,526.55
1	Modulo de señal; entrada/salidas analogicas	SM1234 Modulo se señal de 4 entradas y 2 salidas analogicas. Configurables como V/mA	6ES7234-4HE32-0XB0	$13,701.74	$13,701.74
3	Variador de Velocidad micromaster 440	Micromaster 440 200-240V, 5KW trifasico	6SE6440-2UC24-0CA1	$22,345.06	$67,035.19
1	Pantalla HMI KTP900 Basic	SIMATIC BASIC PANEL KTP900 a color, pantalla de 9", tactil y 8 teclas de funcion, con interfaz PROFINET/industrial Ethernet y USB	6AV2123-2JB03-0AX0	$55,642.74	$55,642.74
2	Fuente de alimentacion a 24V	Fuente de alimentacion de 24 V/ 10 A	6EP1334-3BA10	$4,025.00	$8,050.00
1	Modulo de proteccion selectiva	SITOP PSE200U 10A	6EP1961-2BA41	$3,185.93	$3,185.93
2	Relevador de seguridad	Pilz PNOZ X3	PNOZ X3	$5,520.00	$11,040.00
3	Breakers proteccion para motores				
10	Relevadores de estado solido 24V			$575.00	$5,750.00
1	Boton tipo hongo NC		3SU1150-1BA20-1CA0	$641.10	$641.10
1	Boton NA		3SU1150-0AB40-1BA	$262.82	$262.82
5	riel dien			$138.00	$690.00
	canaleta				
3	terminales tubulares (PAQUETE)			$200.00	$600.00
	pinzas ponchadoras				
1	luminaria led para tablero			$250.00	$250.00
6	Lamparas indicadoras			$96.60	$579.60
12	clemas wedmuiller conexión rapida para calibre 10			$172.50	$2,070.00
12	clemas wedmuiller conexión rapida para calibre 12			$149.50	$1,794.00
20	clemas wedmuiller conexión rapida para calibre 14			$115.00	$2,300.00
5	Cinta de aislar 3M			$92.00	$460.00
	indice de señalizacion (etiquetas)			$300.00	$300.00
1	gabinete de contro rittal			$11,500.00	$11,500.00
1	Gabinete de mando rittal			$5,750.00	$5,750.00
15	Ducto cuadrado			$1,150.00	$17,250.00
10	Tubo conduit			$223.30	$2,233.00

5	Conductor electrico calibre 14 (rollo)			$920.00	$4,600.00
7	Conductor electrico calibre 12 (rollo)			$920.00	$6,440.00
1	Conductor electrico calibre 10 (rollo)	color verde		$1,742.25	$1,742.25
3	Conductor electrico calibre 10 (rollo)	color negro		$1,725.00	$5,175.00
				SUMA TOTAL	$387,530.68
				COSTO TOTAL	$426,283.75

2.1.6 Programación del PLC

Se realizó la programación del PLC en el lenguaje KOP (esquema de contactos) y STL (Listado de instrucciones), para hacer mejor el procesamiento de datos, en la figura 7 se observa el diagrama general para introducirlo al PLC S7300 en el software TIA PORTAL V13 de Siemens. Para ello se ocupó la norma IEC 61131-3 para la programación de PLC en diferentes lenguajes. En las figuras 8, 9 y 10 se muestran la programación que se realizó para poder comunicar los variadores de velocidad con el PLC, así mismo la comunicación entre diferentes softwares.

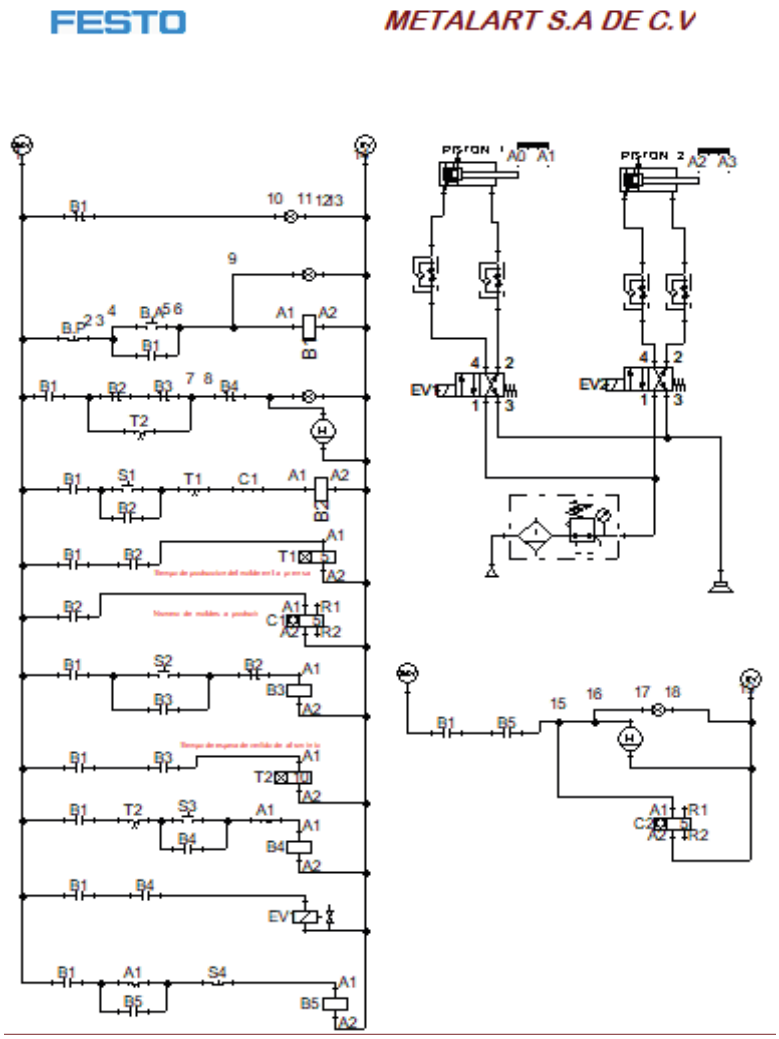


Figura 7. Leguaje KOP

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 23, pp.291 - 302, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

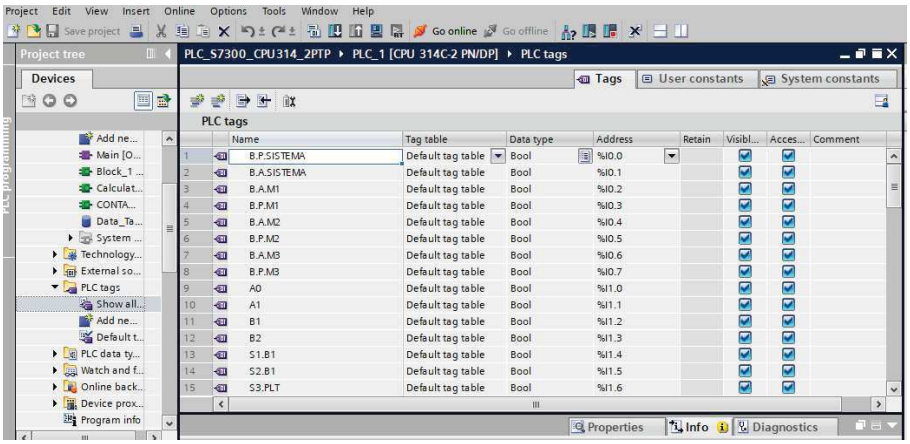


Figura 8. Listado de variables para el programa del PLC S7300

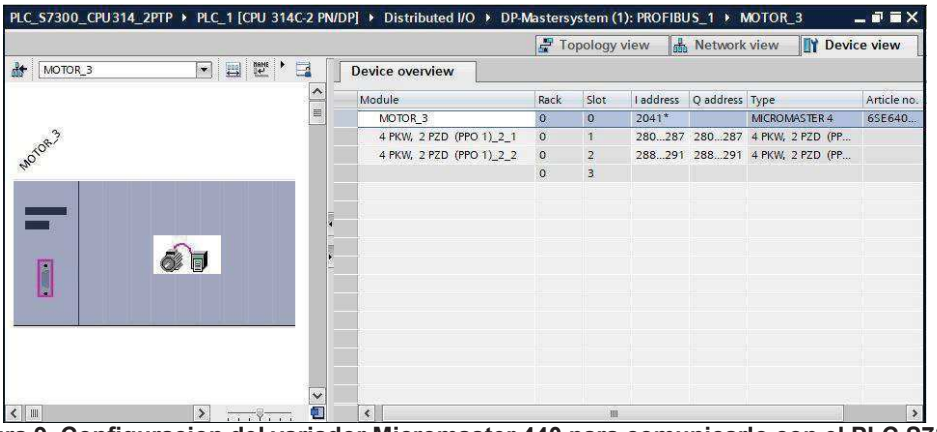


Figura 9. Configuracion del variador Micromaster 440 para comunicarlo con el PLC S7300

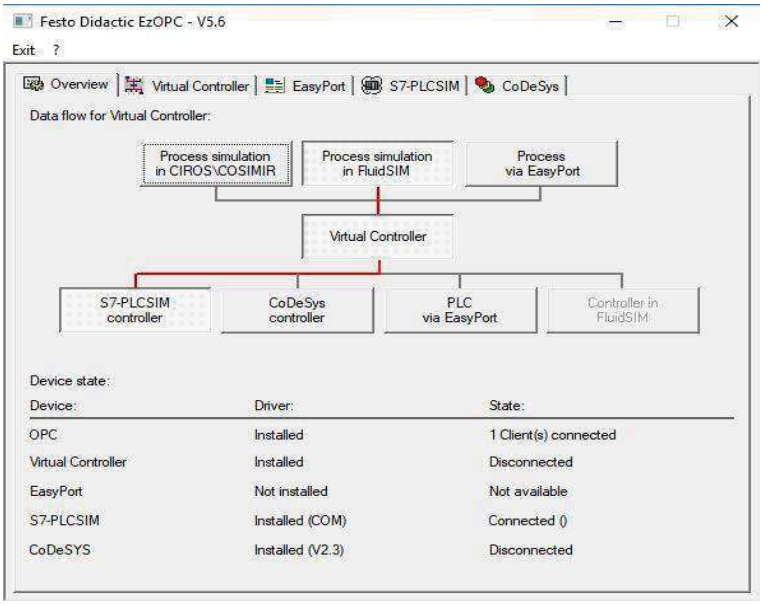


Figura 10. Comunicación de FluidSim con TIA PORTAL V13

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 23, pp.291 - 302, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

3. Resultados

Se realizó las simulaciones correspondientes para comprobar la automatización del sistema de transporte de moldes de arena para ser implementado en la empresa Metalúrgica Artesanal S.A de C.V. Se realizó la comunicación del PLC S7300 con la pantalla HMI KTP 900 BASIC con la comunicación PROFINET, también se realizó la comunicación del PLC S7300 con los variadores de velocidad Micromaster 440 para el control de los motores asíncronos con la comunicación PROFIBUS DP. En la figura 11 se observa la comunicación de nuestros dispositivos para él envió de datos.

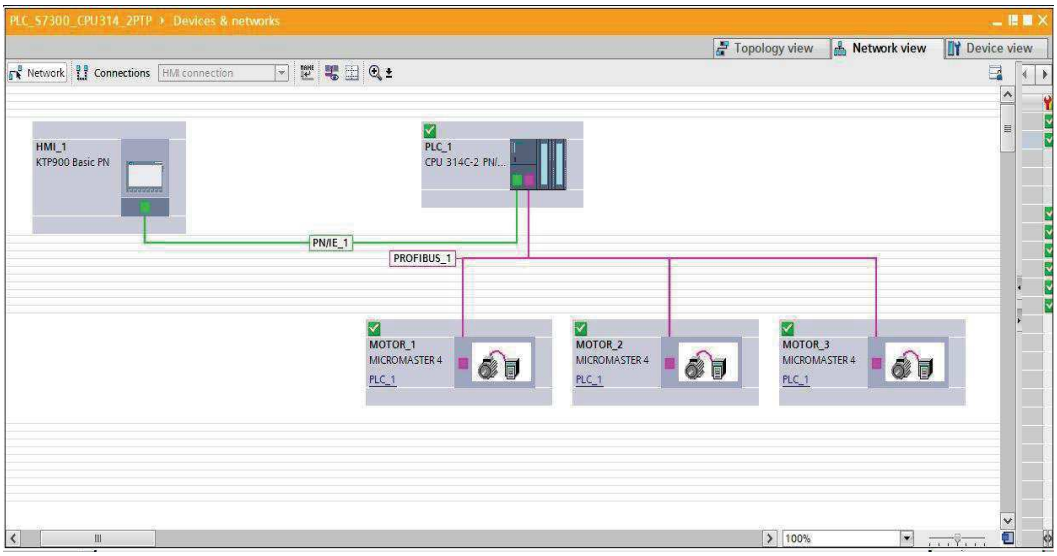


Figura 11. Comunicación PROFIBUS DP y PROFINET

Se comunicó el software TIA PORTAL V13 de Siemens con el Software FluidSim de FESTO para poder simular el funcionamiento de la programación del PLC con sus respectivas entradas y salidas, En la figura 12 se muestra el correcto funcionamiento de los actuadores, en este caso, luminarias indicadoras a 24 V CD, electroválvulas, pistones neumáticos, las señales para los variadores de velocidad. Se observa en la figura 8 la simulación en TIA PORTAL en tiempo real, sobre la activación de entradas y salidas del PLC S7300.

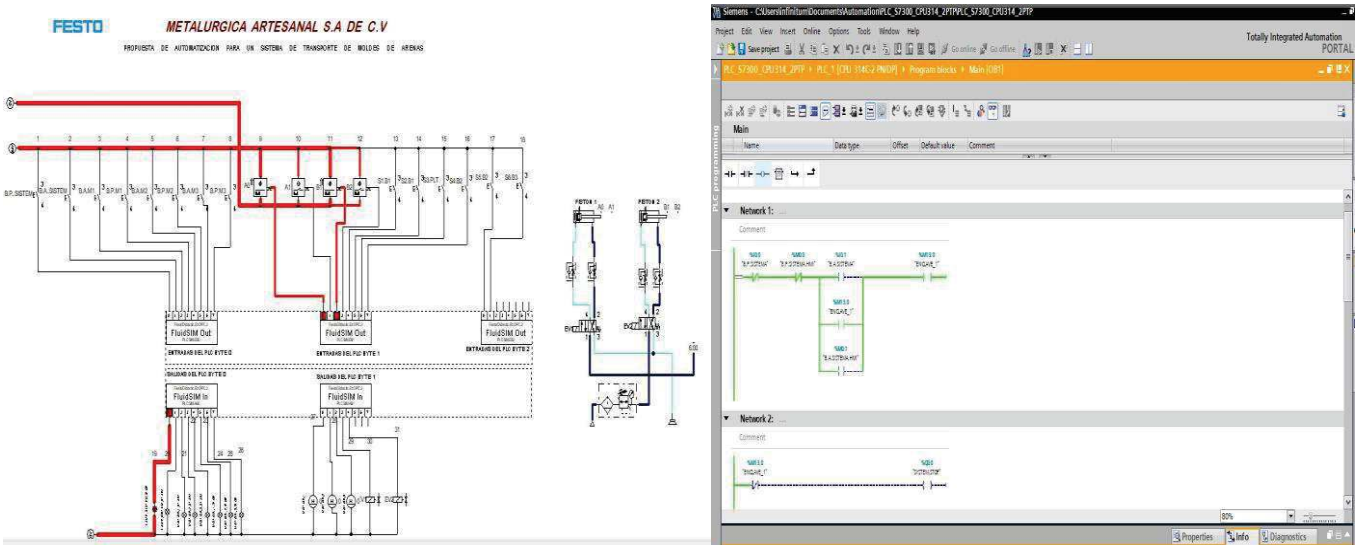


Figura 12. Simulación de entradas y salidas del PLC S7300

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 23, pp.291 - 302, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Se simulo la pantalla HMI KT900 BASIC para el monitoreo del sistema de transporte de moldes de arena, en el cual se le agrego, mensajes de advertencia, indicaciones para el operador, para su fácil manejo del sistema, También para la activación del modo manual y modo automático, así como el conteo del número de moldes que se van realizando durante la jornada laboral dentro de la empresa Metalúrgica Artesanal. En la figura 13 nos indica el monitoreo del funcionamiento del sistema automatizado, el cual resulta muy útil para avisar de cualquier falla del sistema, actuadores o dispositivos eléctricos o electrónicos.

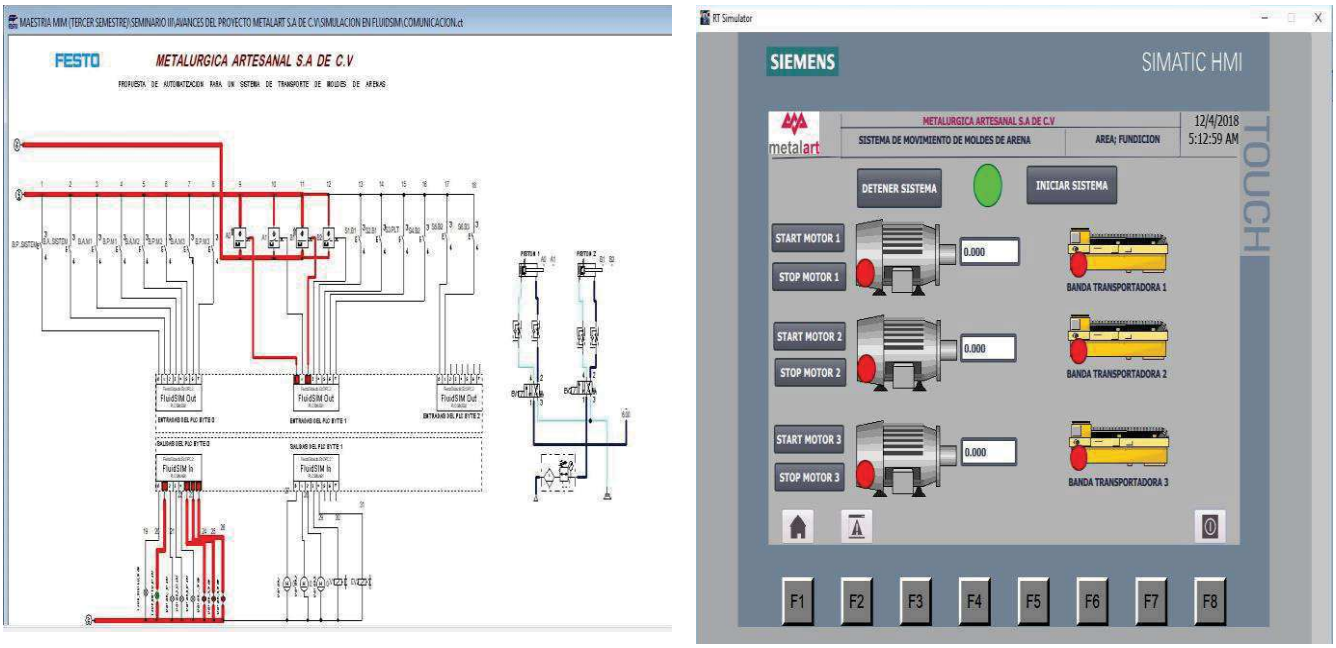


Figura 13. Simulación de la pantalla HMI KTP 900 BASIC

Se realizaron pruebas de laboratorio para la comunicación del PLC hacia los actuadores, el cual se determinó el correcto funcionamiento y programación del PLC S7300, en la figura 14, se muestra las pruebas realizadas para la programación del autómata programable.

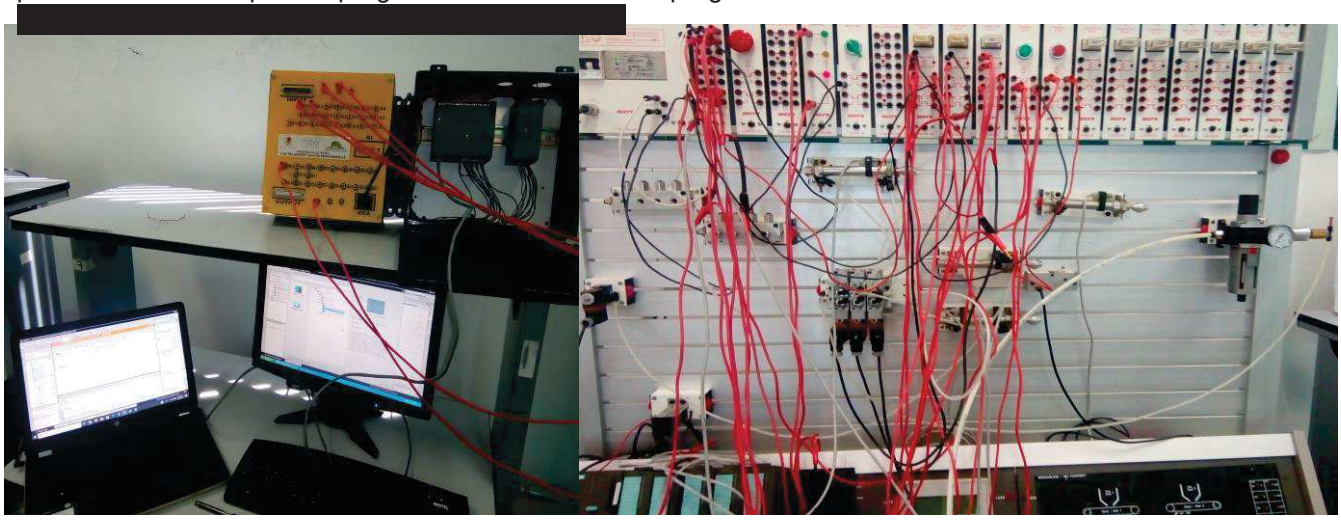


Figura 14. Realización de pruebas de laboratorio de la programación del PLC

4. Conclusiones

La programación del autómata para el sistema de transporte de moldes de arena implica una mejora en el proceso general dentro de la empresa Metalúrgica Artesanal S.A de C.V, entre los beneficios que se obtienen destacan, disminuir o eliminar riesgos de trabajo, el incremento de la eficacia y eficiencia de las tareas, reducir el riesgo de enfermedades en los trabajadores al cargar manualmente los moldes de arena para transportarlos.

Estandarizar un proceso es básico para poder automatizarlo, pues permite simplificar las operaciones y tener una perspectiva integral de las opciones de mejora, conociendo a detalle el comportamiento de las variables que este involucra.

En cuanto al uso de tecnologías, se busca aplicar elementos de vanguardia, como los variadores de frecuencia y Controladores Lógicos Programables, optimizando así el sistema mecatrónico. Apegándose a la industria 4.0 sobre el internet de las cosas.

El sistema de moldes de arena está basado en las siguientes normas, Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012 Instalaciones Eléctricas el cual responde a las necesidades que se requieren para la utilización de la energía eléctrica en las instalaciones eléctricas. IEC60529. Comisión Electrotecnia Internacional que se usan para identificar niveles de protección contra el ingreso. Normalmente conocida como la Protección, estos códigos reflejan la capacidad del gabinete eléctrico de proteger contra el acceso a partes electrificadas por parte de personas, herramientas, humedad, polvo o suciedad. Norma 250 de la Asociación Nacional de Fabricantes de Equipos Eléctricos (NEMA), se ocupa de las especificaciones que detallan los criterios mínimos de la construcción, el rendimiento, pruebas, la corrosión de tableros eléctricos.

La presente propuesta de automatización se elaboró en coordinación con Metalúrgica Artesanal S.A de C.V y el Instituto Tecnológico de Apizaco, respondiendo a las demandas del proceso y proponiendo una solución a la problemática detectada. Como parte del trabajo a corto y mediano plazo, se encuentra la implementación del sistema, para mejorar los procesos productivos en la empresa.

Referencias

[1] E. M. Perez, Automatas Programables y Sistemas de automatizacion, Barcelona: marcombo, 2009.

[2] FESTO, «Process Automation,» 12 junio 2015. [En línea]. Available: https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/377670/Process_Automation_es_2015-07_low.pdf.

[3] Schneider Electric, Instalaciones Electricas Residenciales, Mexico: Schneider Electric Mexico, 2013.

[4] Metalurgica Artesanal S.A de C.V, «Lo hecho en Mexico,» 2018. [En línea]. Available: http://www.lohechoenmexico.mx/metalurgica-artesanal-s-a-de-c-v/#.W2e--tJKjIU.

[5] SMC International Training, «Automatizacion,» 21 11 2015. [En línea]. Available: http://www.smctraining.com/webpage/indexpage/311/. [Último acceso: 21 Julio 2018].

[6] EXSOL, «Automatizacion industrial,» 2017. [En línea]. Available: http://www.exsol.com.ar/automatizacion-industrial/.

[7] E. Harper, El ABC de las instalaciones electricas industriales, Limusa, 2000.

[8] M. C. P. Tejuelo, «Repositorio Institucional UPV,» 2018. [En línea]. Available: https://riunet.upv.es/handle/10251/58883.

[9] G. M.P, Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing, International Editions: Prentice Hall, 1987.

[10] E. Velázquez, «CIATEQ REPOSITORIO INSTITUCIONAL,» 12 10 2018. [En línea]. Available: https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1020/28.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 24, pp.303 - 313, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Análisis del Corte Ortogonal para Diseño de Cuchillas de una Máquina Trituradora de PET Mediante Ansys

Texis Texis Eduardo[1], Hernandez Corona Francisco[1], Mollinedo Ponce de León Helvio Ricardo[2], Bedolla Hernández Marcos[1] y Rojano Merchant José Ignacio[1].

[1]TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO/INSTITUTO TECNOLOGICO DE APIZACO Av. Instituto Tecnológico S/N, cp. 90300, Apizaco, México. texis_live@hotmail.com

[2]INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UPIITA. Av IPN 2580, La Laguna Ticoman, 07340 Ciudad de México, CDMX

Resumen

En el presente trabajo se estudia el análisis del efecto del corte ortogonal en una cámara de molienda mediante una simulacion de corte en Explicit Dynamics *ansys con la finalidad de definir la velocidad correcta de corte de las botellas plásticas de PET en su forma compactadas como para botellas de forma estandar. Para el corte ortogonal se toman en cuenta 3 factores importantes, la potencia, la velocidad de avance en el corte y la velocidad de giro de la herramienta. El estudio del corte ortogonal por medio del método del elemento finito ha sido ampliamente estudiado para materiales metálicos en su gran mayoría como lo es el caso del trabajo " simulacion por elemento finito de corte ortogonal de metal en 3D" el cual obtiene como resultado que la forma y el Angulo de incidencia de la herramienta de corte afectan significativamente la concentración de esfuerzos en el material que se procesó, para el trabajo " energy consideration in metal machining" contemplan la cantidad de energía necesaria para poder obtener una viruta de un material metálico o no metálico. El análisis por elemento finito del corte de las botellas de PET se ocupa para observar y determinar la velocidad adecuada de funcionamiento de la cámara de molienda de un máquina trituradora de PET esto debido a que si la velocidad es muy poca causa un fenómeno conocido coloquialmente como apelmazamiento y si la velocidad es excesiva se causa un fenómeno de la cámara de molienda conocido como pulverización del material, la velocidad adecuada de funcionamiento se determinó en un rango de 600 – 700 RPM, la simulacion se llevó acabo con un acero sisa D2 para la cuchilla, las botellas plásticas cuentan con una densidad de 1380 Kg/m^3 y un esfuerzo máximo a tensión de 42.765 N/mm^2.*

Palabras claves: Cámara de Molienda, Trituracion, Especificación de Energía Consumida, Corte Ortogonal, PET, Elemento Finito.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 24, pp.303 - 313, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

1. Introducción

En el corte ortogonal se usa una herramienta de corte en forma de cuña en la cual el borde cortante es perpendicular a la dirección de la velocidad de corte, es una operación de corte donde se forma una viruta que se encuentra en relación con la velocidad de corte, la profundidad de incisión del material y el ángulo de incisión de la herramienta de corte. Para el diseño de las herramientas de corte ortogonal se tienen que definir varios factores entre los más importantes son el espesor de la viruta que se quiere obtener, el ángulo de abertura del herramental, la anchura de la viruta.

Existen diferentes desprendimientos de viruta acorde al material, los materiales dúctiles como el cobre o el aluminio dan virutas largas y rizadas continuas y algunos materiales de una dureza superior a los anteriores generan una viruta discontinua, de manera general las virutas son clasificadas en 3 tipos:

1. Viruta continua: en el maquinado de materiales dúctiles con avances y profundidades pequeñas a altas velocidades, produce buen acabado superficial.
2. Viruta de borde recrecido: el maquinado de materiales dúctiles a baja velocidad o mediana, la fricción entre la herramienta y viruta causa acumulación de material de trabajo en la cara de ataque de la herramienta, causando malos acabados.
3. Viruta discontinua: el maquinad de materiales frágiles abajas velocidades de corte produce virutas discontinuas causando malos acabados y vibraciones en la maquinas [1].

En la figura 1 se muestran los 3 tipos de virutas que se pueden generar mismas que ya fueron descritas en la parte anterior, la formación de cada una de estas virutas está directamente relacionada con el tipo de material y la velocidad a la que gira el cortador o la pieza de trabajo.

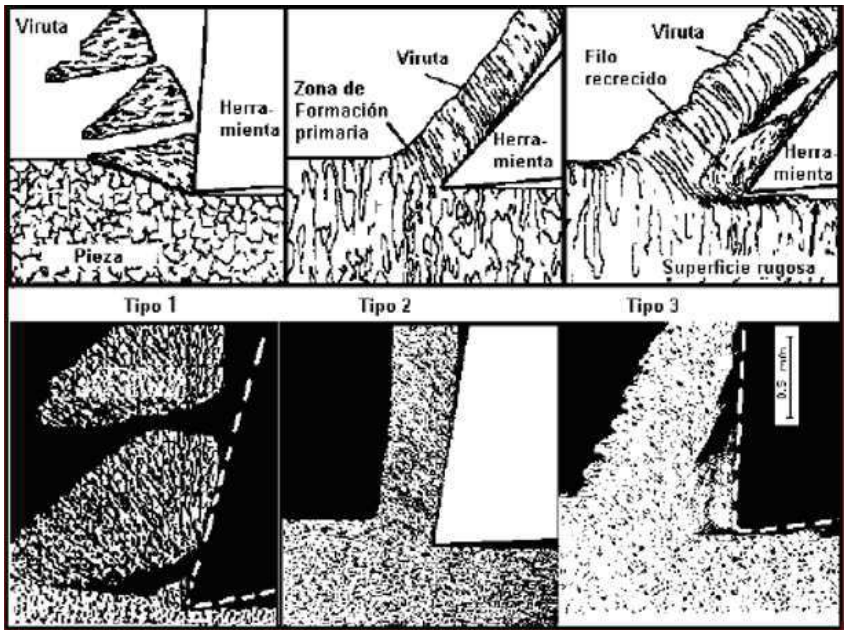


Figura 1. 3 tipos básicos de virutas obtenidas dela operación de corte ortogonal.

Existe una amplia relación entre el corte ortogonal donde la herramienta es la parte giratoria y el proceso de torneado donde es la pieza la cual se encuentra girando a velocidad constante, pero mantiene la creación de los 3 tipos de viruta y mantienen la “relación de corte”, esta se define como la relación que existe entre el espesor de la viruta y la anchura de la viruta que se espera obtener [2].

Los materiales plásticos no son una excepción a esta teoría gracias a la introducción de materiales polímeros como materia prima para la creación de engranes, ejes y una gran diversidad de herramientas maquinadas por medio del corte ortogonal o torneadas.

El uso de los materiales plásticos en la vida cotidiana se ha vuelto un problema ambiental grabe a nivel mundial debido a la producción sin medida de envases plásticos para refresco, agua, aceites, detergentes. Etc., que tienen un periodo de vida útil muy corto, la industria refresquera ha buscado contrarrestar este problema medio ambiental mediante la reducción del periodo de degradación de sus envases plásticos que son normalmente hechos con PET, un polímero que tiene la característica de ser reciclado casi en su 100%.

Existen diferentes maneras de llevar acabo el reciclado de las botellas plásticas de PET, como lo son el método químico y el método mediante maquinas trituradores. Debido a que se busca disminuir la contaminación de nuestro medio ambiente se prefiere la utilización del método mecánico para la reprocesamiento de las botellas plásticas.

La maquinas trituradoras de PET se pueden clasificar en sub sistemas los cuales se contemplan como: cámara de molienda, tolva y sistema de trasmisión. Este trabajo se enfoca en lo que sucede dentro de la cámara de molienda. La cámara de molienda cuanta con unas cuchillas que se encuentran rotando a velocidad constante y un par de cuchillas fijas para llevar a cabo el proceso de corte, para esto se plantea la utilización de la teoría del corte ortogonal para dimensionar las cuchillas de corte y poder de esta manera optimizar su operación y definir la velocidad de operación de la cámara de molienda. La adecuada velocidad de procesamiento reflejara un acabado en las hojuelas de botellas plásticas de mejor calidad y se espera que gracias a esto se tenga un aumento en la eficiencia de la cámara de molienda.

2.Metodologia de diseño de la cuchilla giratoria

Las cuchillas giratorias de las cámaras de molienda posen geometrías diferentes, existen desde las simples que contienen un aspa y las demasiado complejas que cuentan con más de 6 aspas, causando una reducción en el tamaño de incidencia a la hora de realizar el corte. La importancia del número de cuchillas que se utilizan en cámaras de molienda de dimensiones similares también es un dato importante a tomar en cuenta, la relación que se puede denotar es que las cámaras de molienda que son especializadas en el procesamiento de botellas compactadas por lo general tienen un ángulo de separación entre sus aspas menor de 32° y las que se ocupan para procesar botellas de PET enteras superan los45°.

La cuchilla que se plantea diseñar y analizar, será ocupada para una cámara de molienda que es capaz de procesar 350 kg/ hora, con una potencia de 25 Hp y una velocidad de giro que puede ir desde las 400 hasta las 700 RPM, un valor que será definido tras la simulacion del corte.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 24, pp.303 - 313, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

2.1 fuerza requerida para cortar el PET

Como primer punto es indispensable conocer que fenómeno se suscitará dentro de la cámara de molienda y determinar las fuerza que se requiere para cortar las botellas de PET. La fuerza necesaria para obtener un corte por cizallamiento de una viruta de 3mm de espesor y 30mm de anchura es la de 3.848 KN [3]. La diferencia entre un corte ortogonal y un corte por cizallamiento es que mientras menor sea la velocidad a la que se lleve a cabo la operación el corte será más fino y preciso, para el caso del corte por cizallamiento y para el corte ortogonal se busca que el corte sea rápido para obtener virutas continuas con un espesor de 3 mm y una anchura de 30mm, las fuerzas que interactúan en la operación de corte por cizallamiento y las de el corte ortogonal se muestran en la figura 2.

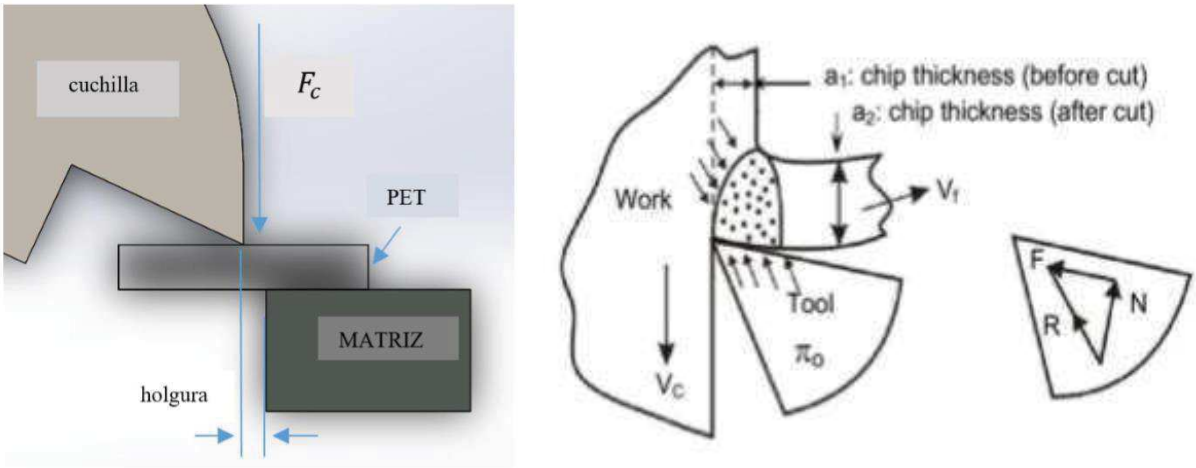


Figura 2. Fuerza de corte por cizallamiento [2] y Fuerzas en el corte ortogonal [3].

El diámetro de la cuchilla de corte propuesta se fija con un diámetro de 200mm ajustándose al tamaño comercial que se encuentran disponibles en mexico, con 3 aspas de corte debido a que se busca que la cámara de molienda sea capaz de procesar botellas enteras y compactadas, de manera presencial se observa que las botellas de plástico recientes que tienen la capacidad de ser desechadas de forma torsional para reducir su volumen al no efectuarse esta acción y introducirlas enteras se enrollan y forman espesores mayores de PET a cortar, si la fuerza de corte no es la adecuada se causan atascamientos que derivan en daños al sistema de trasmisión, al eje y a las cuchillas, es por este punto que se espera que la fuerza de corte ortogonal supere la mínima requerida de 3.848 KN unas 10 veces para asegurar que no habrá atascamientos de ningún tipo en la cámara de molienda.

2.2 Metodologia de diseño de la cuchilla

Al no contar con un método de diseño específico para cuchillas de máquinas trituradoras de PET, en este trabajo se propone la utilización del método del cote ortogonal para definir el perfil de corte que tendrá la cuchilla y el tipo de contacto que tendrá con el material. Se establecen los siguientes para metros como constantes en el diseño. La viruta tendrá una anchura t_c de 9mm y un espesor t_0 de 30mm y partiendo de la figura 3, se establecen los ángulos del perfil de la herramienta de corte, el ángulo formado entre la herramienta y la pieza a cortar $\propto = 8°$, el ángulo de abertura que tiene la pieza basado en [4], indica que para obtener el tipo de viruta 2 es necesario que el ángulo β

se encuentre entre 60° - 72°, para este diseño se establece en 66° y el ángulo de ataque de la herramienta queda como $\gamma = 16°$.

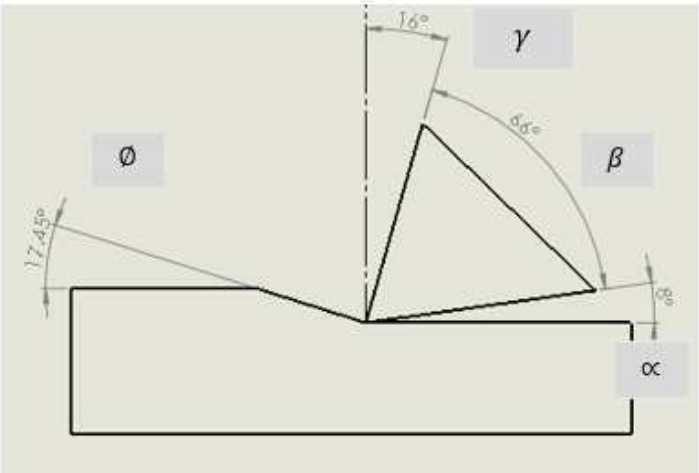


Figura 3. Ángulos de interés en el corte ortogonal.

Como ya se comentó para determinar si el diseño es óptimo se comienza calculando la relación de corte con el valor de 0.3 el cual es un valor adimensional ya que es una división entre valores con las mismas unidades, posterior mente se calcula el ángulo de cizallamiento que tendrá el corte ortogonal con la ecuación 1, donde r es la relación de corte [5].

$$\tan\emptyset = \frac{\mathrm{r}\cos\gamma}{1 - \mathrm{r}\,\mathrm{sen}\gamma} \tag{1}$$

Al resolver la ecuación 1 se obtiene que el ángulo de cizallamiento $\theta = 17.45°$, en cualquier tipo de proceso de maquinado es importante tener en cuenta a la hora del diseño las propiedades del material que se pretende procesar en este caso se trata del PET y se requiere de conocer el esfuerzo máximo a tensión τ mencionado anterior mente y al calcular la fuerza de corte secundaria Fs con la ecuación 2 donde AC es el área de la viruta que se espera obtener que tiene un valor de 270mm^2.

$$Fs = \frac{\tau_y\, AC}{sen\ \emptyset} \tag{2}$$

Al resolver la ecuación 2 se obtiene que el valor de la fuerza secundaria es de 38.504KN, para obtener el valor de la fuerza de corte Fc se obtiene con la ecuación 3 la que aplica los ángulos previamente establecidos [6].

$$Fc = \frac{Fs\cos(\beta - \gamma)}{\cos(\emptyset + \beta - \gamma)} \tag{3}$$

Al resolver la ecuación 3 se obtiene que la fuerza de corte resultante con los ángulos planteados inicialmente es de 64.538 KN, que supera la fuerza mínima establecida más de 16 veces, por lo que se considera ideal para realizar el corte de acumulaciones de material en la cámara de molienda y evitar el atascamiento. La velocidad de corte Vc se calcula con la ecuación 4, donde n son

las revoluciones por minuto a las que trabajaran las cuchillas y D es el diámetro de la cuchilla de 200mm [7].

$$Vc = \frac{\pi Dn}{1000} \quad (4)$$

Asi como la potencia que gasta cada una de las cuchillas al realizar un corte, esta viene definida por la ecuación 5.

$$P_c = F_c \frac{V_c}{60} \quad (5)$$

En la tabla 1 se muestra la velocidad de corte para diferentes velocidades de operación de la cámara de molienda que van de 400 a 700 RPM. Y la potencia requerida por cada cuchilla para dicha operación.

Tabla 1. Velocidad y potencia de corte.

RPM	Vc (m/min)	Pc (W)	Pc(HP)
400	251.328	811.0103232	1.087581064
450	282.744	912.3866136	1.223528697
500	314.16	1013.762904	1.35947633
550	345.576	1115.139194	1.495423962
600	376.992	1216.515485	1.631371595
650	408.408	1317.891775	1.767319228
700	439.824	1419.268066	1.903266861

2.3 Geometría y material de la cuchilla

El material seleccionado para la cuchilla es el acero sisa D2 el cual es uno de los más utilizados para la fabricación de cuchillas de trituracion de PET, las propiedades físicas del material que son de suma importancia para el análisis por elemento finito son que cuenta con una densidad de 7695 kg/m^3 y un módulo de elasticidad de 207 GPa, se considera un numero de poisson´s de 0.3. en la figura 4 se muestra el modelo 3D de la cuchilla, dibujada a partir de los ángulos obtenidos. En la tabla 1 se muestra que la fuerza de corte es la misma para la cuchilla independiente dela velocidad a la que se encuentra girando su velocidad de corte cambia y la potencia consumida aumenta, cabe mencionar que la potencia consumida en el corte no especifica la potencia requerida por la cámara de molienda para procesar los 350Kg/hora de PET que se quieren procesar, esto con el antecedente de que la cámara de molienda con 8 cuchillas y una potencia de 25HP es capaz de procesar la cantidad de botellas antes mencionadas según las maquinas existentes en el mercado.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 24, pp.303 - 313, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

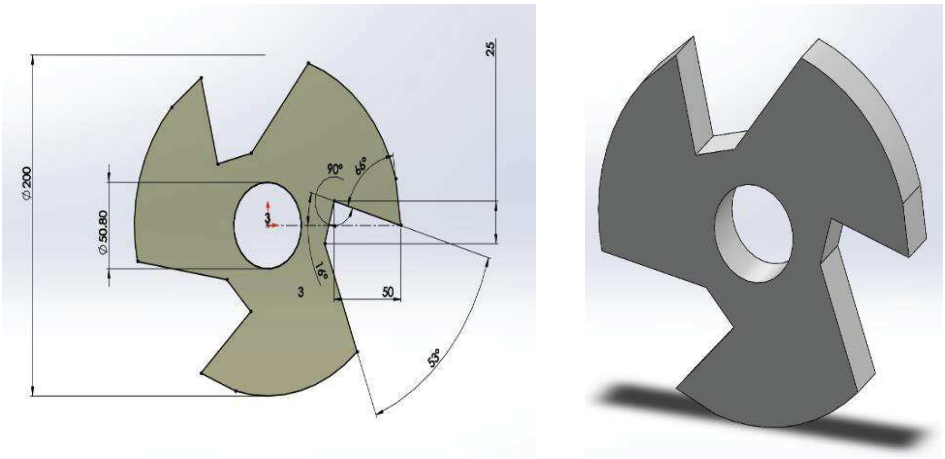


Figura 4. Modelo en CAD de la cuchilla.

3. Resultados

La simulacion de la operación de corte ortogonal en las botellas de PET se realizaron en ANSYS (Explicit Dynamics), con las siguientes características del PET: cuenta con una densidad de 1380 kg/$m3$,en el programa se cargó la gráfica esfuerzo – deformación característica del PET, las velocidades de análisis se convirtieron a radianes por minuto para poder ser cargados, la velocidad rotacional se considera constante, la cuchilla fija se coloca sin filo debido a que se pretende que a cuchilla rotacional sea la única que realice la trituracion del PET.

3.1 Condiciones de frontera

Se delimita la simulacion a una sola cuchilla completa instala sobre su eje el cual se especifica como rígido y de bajo interés en la simulacion por lo que su mallado carecerá de refinamiento, las cuchillas respecto al eje cuentan con una relación de articulación, esta permite que gire en su propio eje sin vibrar ni desplazarse a los lados, si idealizo la forma de un rectángulo para una botella plástica compactada con un espesor de 3 mm, se idealiza el perfil de la cámara de molienda como una pieza metálica con acero D2 debido a que el interés en esa sección de la cámara de molienda no es relevante para este análisis. La cuchilla es mallada con elementos tetraédricos de 8 nodos y la botella plástica con elementos cuadriláteros, como se observa en la figura 5.

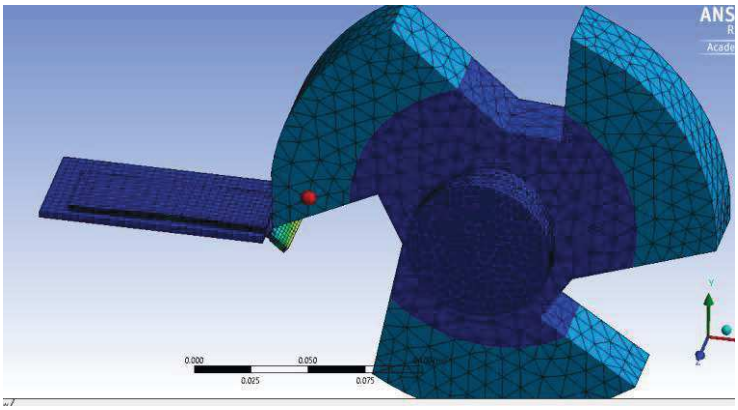


Figura 5 . Mallado de la cuchilla y de la botella plástica idealizada deforma compacta.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 24, pp.303 - 313, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

3.2 Simulacion de corte de botella compactada.

Debido a que la diferencia de la velocidad de corte es muy pequeña entre 400 y 450 se realiza la simulacion únicamente con 400 RPM, en la figura 6 se observa como la fractura del envase plástico se apelmaza y el corte no es 100% limpio como cabría esperar a una relativa baja velocidad baja siguiendo la teoría del corte por cizallamiento.

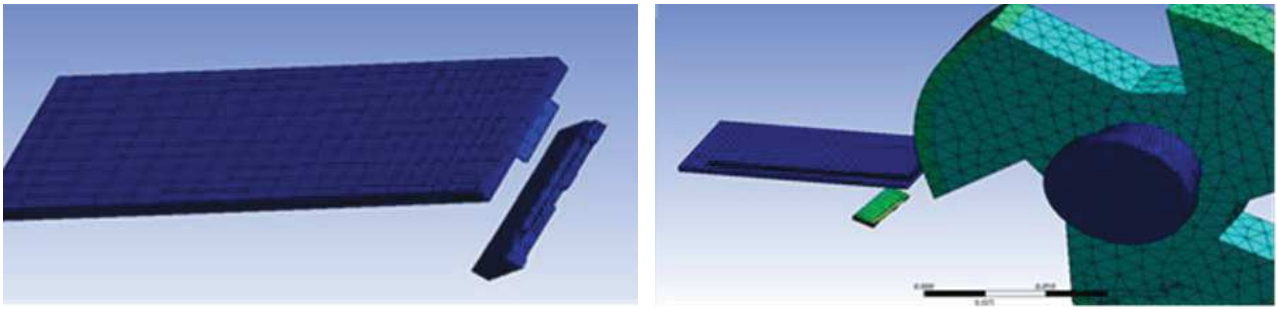


Figura 6. Corte a 400 RPM

A la velocidad de 500 RPM se observa que el corte forma un rastro de desprendimiento de viruta propio del corte ortogonal para materiales frágiles, pero no el esperado para el diseño que se propuso con los ángulos de incidencia de la cuchilla como se observa en la figura 7.

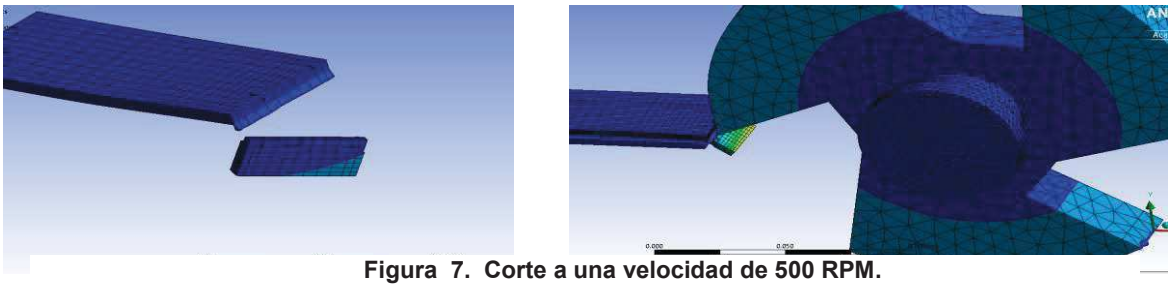


Figura 7. Corte a una velocidad de 500 RPM.

Al aumentar la velocidad de giro de la cuchilla hasta las 600 RPM se observa que el aumento de la velocidad genera que el material sea desprendido de una manera más agresiva que todas las anteriores, pero sin conseguir que el corte sea totalmente fino como se esperaría de una viruta de tipo 2 como se muestra en la figura 8.

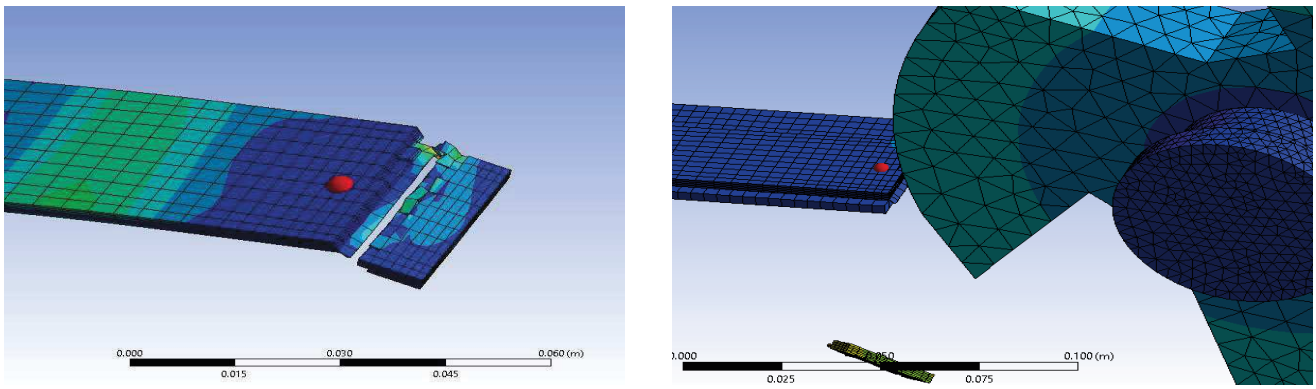


Figura 8. Corte a una velocidad de 600 RPM.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 24, pp.303 - 313, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Para la velocidad de 700 RPM se observa que el corte es más limpio y más parecido al que se esperaría para un desprendimiento de viruta de tipo 2. En la figura 9 se observa este efecto asi como la disminución de concentración de esfuerzos en la zona del corte.

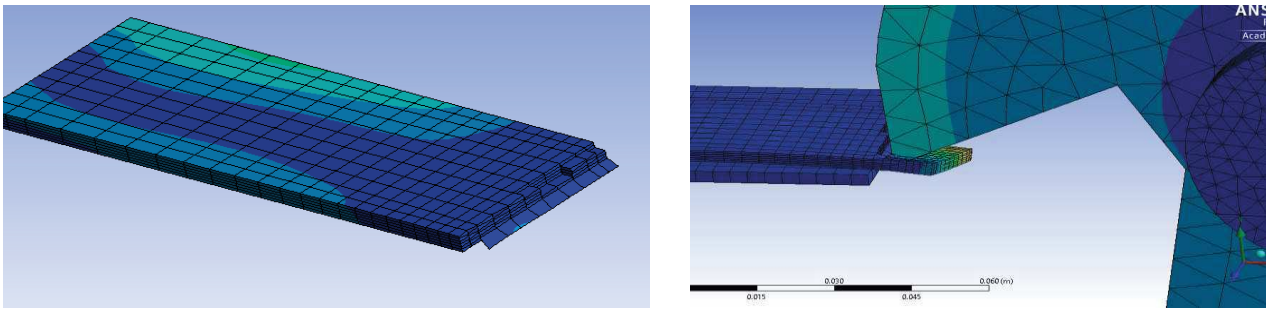


Figura 9. Velocidad de corte a 700 RPM.

Se realizaron dos simulaciones extra aumentando la velocidad de giro de 700 a 800 y finalmente a 900 debido a que se quiere evitar el fenómeno de pulverización, en la figura 10 se observa que el corte a una velocidad de 800 RPM es demasiado fuerte para el material debido a que lo fragmenta en demasiados pedazos, perdiendo la noción de una viruta de tipo 2. Se comprende debido a que la fuerza inercial de una masa que se encuentra girando aumenta dependiendo de la velocidad a la que gire y al no presentarse un avance prolongado de corte la botella se fragmenta en pedazos muy pequeños y corre el riesgo de volverse polvo y perder ese material en forma de merma.

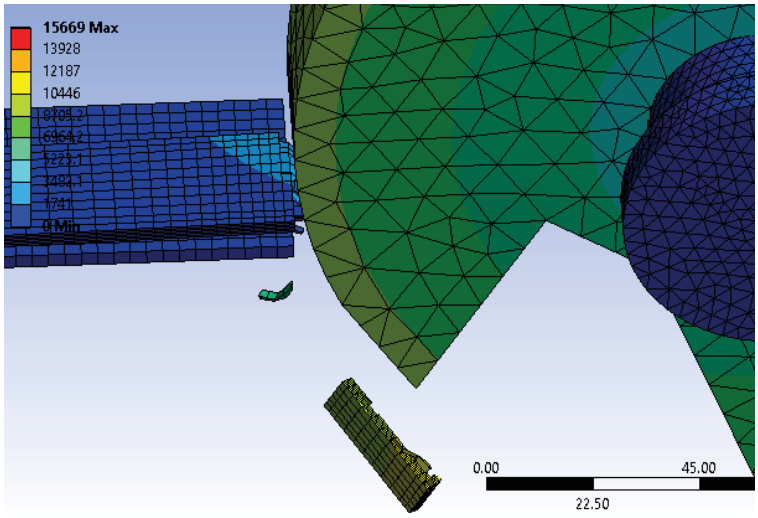


Figura 10. Corte a una velocidad de 800 RPM.

A manera de rectificación se realiza una simulacion aumentando la velocidad de giro a 900 RPM para descartar que la cuchilla se llegara a comportar como en el caso de la velocidad a 600 donde el corte fue muy destructivo y la velocidad de 700 donde el corte fue relativamente bueno en comparación con las demás pruebas. En la figura 11 se observa que no es el caso entre más aumenta

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 24, pp.303 - 313, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

la velocidad la fragmentación en pequeños pedazos del material tiende a aumentar en lugar de disminuir o aproximarse más al corte deseado.

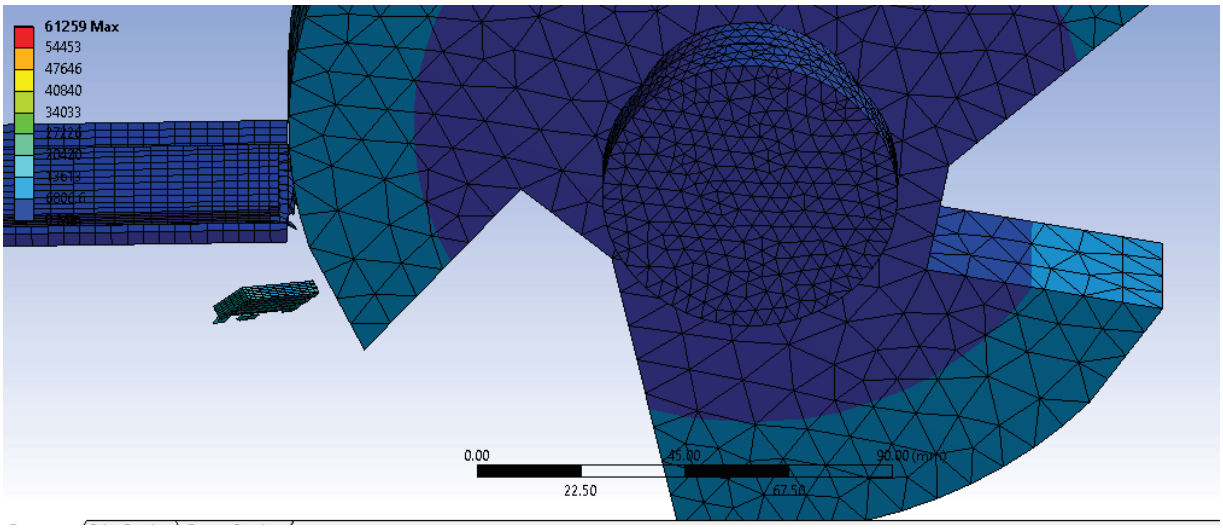


Figura 11. Velocidad de corte a 900 RPM.

4. Conclusiones

Tras el análisis de los resultados podemos definir que la velocidad ideal de operación de la cámara de molienda se tiene que encontrar en el rango de 700 a 750 RPM, debido a que son las velocidades que entregan una forma de corte más limpia a diferencia que una velocidad relativamente baja de 400 RPM que si bien consume menos energía para realizar el corte, también corre el riesgo de un atascamiento al no tener la capacidad de desprenderlo de un solo golpe de manera eficiente.

El diseño de la cuchilla y de su perfil se consideran adecuados para llevar a cabo su trabajo como se muestra en la figura 12 la abertura que posee entre aspa y aspa está delimitada por un ángulo de abertura de 53° es el idóneo para procesar botellas plásticas de refresco de 3 litros que se consideran, los envases más grandes fabricados con PET de manera industrial y de mayor demanda.

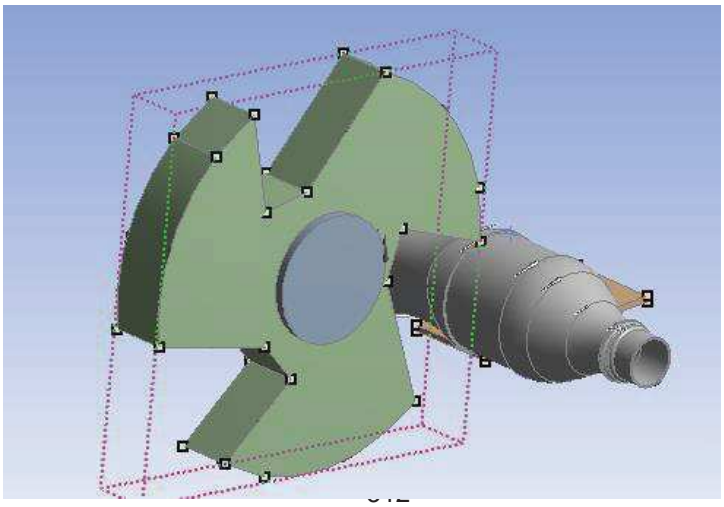


Figura 12. Diagrama esquemático de la cuchilla y una botella de PET.

Se pretenden llevar acabo simulaciones con botellas de PET sin compactar para determinar si el corte se comporta de la misma manera, tras la selección de la velocidad de 700 RPM como la adecuada se determina que la potencia necesaria del motor es de 25HP para una cámara de molienda con 8 cuchillas giratorias

Bibliografía

[1] Silva.W. *" Ingenieria y procesos de manufactura I",* universidad nacional de ingeniería, universitaria, primera edición, 2011-13067,13 - 19 , 2012.

[2] Pang.L.*" Metal cutting forces fro engineerring alloys",* University of Ontario Institute of Technology, primera edición,8- 23, 2012.

[3] Texis.E, Hernandez.F,Mora.C,Bedolla.M,Diaz.J.*"Diseño de cámara de molienda de una máquina trituradora de PET"* SOMI congreso de instrumentación,UNAM,torreón a 2018.

[4] Tao Peng and Xun Xu, "Energy-efficient machining systems: a critical review", International Journal of Advanced Manufactuting Technology, (2014), pp. 13891406.

[5] Viktor P, Xinran X.*" A methodology for practical cutting force evaluation based on the energy spent in the cutting system"*, Machining Science and Technology, 12:325–347,326-350,2008.

[6] Hoa, P, This bich, M, Tien, B.*" Simulation studies on chip formation process in high speed milling of aluminium alloy"*, Journal of Science and Technology 54 (5A) (2016) 174-184.

[7] Sandeep D, Swamini, C.*" Energy consideration in metal machining",* International Journal on Intelligent Electronic System, Vol. 9 No. 1. January 2015.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 25, pp.314 - 327, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Aplicación de Dispositivos Lógicos Programables a Prototipo Pelador de Nopal

Fernando Ibarra Cedano, Víctor Manuel Jiménez Peña
Jesús Arturo Ortega Vázquez, Jesús Alberto Velueta Oliva y
Jorge Sosa Sales

Universidad Tecnológica de Nayarit
jrgsosav@gmail.com

Resumen

El presente documento presenta la investigación realizada dentro del ámbito alimenticio en la que se buscó mejorar el proceso de remoción de espinas de un nopal. La investigación se llevó a cabo puesto que se observó que dentro del estado se tienen muchos establecimientos que llevan a cabo la remoción de las espinas del nopal en donde la remoción se realiza de manera manual, con lo que durante la investigación se desarrolló un artefacto que servirá de soporte para realizar esta actividad de una manera más eficiente y con un menor riesgo al que se está sometido actualmente.

Para el desarrollo de esta herramienta se investigó sobre antecedentes y otras máquinas peladoras de nopal que se hayan realizado en otros estados de la república y una vez hecho esto se realizó la que fue considerada como la mejor opción para realizar la actividad de remover las espinas.

Palabras clave: PLD's, lógica combinacional y espinas de nopal.

1. Introducción

Se ha realizado una investigación en el estado de Nayarit para ver cuáles son las principales problemáticas del sector alimentico, donde encontró que uno de los problemas más comunes que existen en este sector, es el de limpiar las espinas de la hoja de nopal, por lo tanto, se pretende crear una máquina que sea capaz de eliminar las espinas de la hoja dejándola en condiciones para ser empaquetada y posteriormente venderla al mercado.

La investigación fue llevada a cabo por estudiantes de la universidad tecnológica de Nayarit de 10mo cuatrimestre de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica. Para dar una solución real a la tediosa tarea de limpiar las espinas de la hoja de nopal, primeramente se realizó una investigación sobre otras máquinas peladoras de nopales en los demás estados del país y así recaudar ideas para realizar una máquina que pueda ser más eficiente y por su puesto buscar la manera que el costo fuese menor al de las ya existentes ya que una de las principales metas es que el producto esté al alcance de todos.

En el municipio de La Magdalena Tlaltelulco se elaboró por primera vez una máquina desespinadora de nopal de origen mexicano. El ingeniero en mecatrónica, Felipe Agustín Melendez Rosas, profesor jubilado y actual inventor de la desespinadora investigó durante 6 años para su diseño y fabricación la Maquinopal. Con un costo de 180 mil pesos y la capacidad de pelar de 15 a 20 nopales por minuto. [1]

El departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola en la Universidad Autónoma Chapingo, ha impulsado en diversas ocasiones la solución del desespinado mecánico. Aunque cuenta con un

prototipo, no cumple con los requisitos mínimos de calidad que demandan los productores. No corta las orillas y desespina solo una cara por paso.

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional. A petición de productores de San Martín de las Pirámides, Edo. México, se diseñó una máquina para desespina nopal. Sin embargo, el proyecto se trunca rápidamente por falta de financiamiento y queda solo un primer prototipo. El prototipo utiliza el principio de funcionamiento de una serie de rodillos que jalan el nopal y lo hacen pasar por una cuchilla que corta las espinas. No corta las orillas y desespina solo una cara por paso. [1]

Desespinadora del Dr. Rodolfo Moctezuma, Hidalgo, México. El Dr. Rodolfo Moctezuma, fabrica una máquina desespinadora de nopal verdura, misma que tiene una representación en Monterrey, Nuevo León. La máquina desespina tanto en las caras como en el borde del nopal en el primer paso, además de tener un sistema adicional para hacer trozos. Su alimentación puede ser horizontal o vertical, tiene principios de solución sencillos, se adapta a las necesidades de los pequeños productores y su costo oscila entre los $115, 000.00 y $130, 000.00.

Teniendo en cuenta los antecedentes antes mencionados sobre las distintas maquinas peladoras de nopales pasamos y viendo cada una de sus características nos dimos cuenta que una de las oportunidades de mejora que tienen la gran mayoría es el precio, por lo que ahí se tiene una ventaja potencial.

Hablando del proyecto de los estudiantes de la universidad tecnológica aquí se puede encontrar una posible justificación de ser del mismo puesto que los otros proyectos como se puede observar anteriormente, tienen algunas características buenas, pero otras significativamente son una oportunidad de mejora la misma que aprovecharemos para poder realizar un prototipo funcional y de bajo costo con el uso de los dispositivos PLD’s.

2. Desarrollo

A fin de tener una idea entre las diversas maneras las cuales puede realizarse una máquina que haga la actividad de quitar las espinas del nopal se optó por realizar una investigación sobre otro tipo de máquinas que realicen la misma tarea en caso de existir y de no existir buscar mecanismos y algunas herramientas que pudieran ser de ayuda para realizar esta actividad.

Para esto, mediante la investigación se pudo encontrar que efectivamente existen diversos lugares del país donde se han realizado proyectos similares, aunque cabe destacar que muchos de los mismos no obtuvieron los resultados esperados y esto nos llevó a tener motivación puesto que nuestra idea era buscar la forma de realizar esta actividad mediante un sistema automático o semiautomático efectivo. Algunas de las ideas propuestas encontradas fueron las siguientes:

- **Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional de ciudad México.** Intentó desarrollar una máquina desespinadora, sin alcanzar buenos resultados. Sin embargo, están en la disposición de revivir el proyecto si un grupo de productores lo solicitan. Dr. Adrián Espinosa, Jefe de Centro de Diseño y manufactura. [2]
- **Centro de Investigación y Asistencia Técnica del estado de Querétaro CIATEQ.** El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, apoyó al CIATEQ, para desarrollar una máquina para desespinar nopal; quien trabajo conjuntamente con productores del estado de Puebla y Chihuahua. El proyecto no alcanzó resultados satisfactorios y está suspendido
- **Unidad Profesional interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas.** Como trabajo de tesis nivel licenciatura, los ingenieros Guillermo Cruz y Jacob Moreno desarrollaron, un dispositivo para pelar nopal. Corta las orillas de nopal satisfactoriamente y

solo pela una cara del nopal por paso. Se requiere de implementar otras etapas que perfeccionen el prototipo. Un trabajo con futuro que requiere financiamiento. [3]

Diseño y desarrollo de la herramienta

Dentro del estado de Nayarit se encuentran diversos establecimientos dedicados a la venta y distribución de la hoja de nopal, mismos establecimientos que tienen además la tarea de realizar el pelado del nopal. Este procedimiento en tiempos actuales es llevado a cabo de manera manual con la ayuda de una navaja para rasurar en algunos de los casos y en algunos otros se utilizan cortadores de diversos tipos o simplemente cuchillos bastante afilados. El uso de esta herramienta depende muchas de las veces del tipo de nopal así como de su grado de madurez. Cabe señalar que dicha actividad resulta ser una actividad peligrosa puesto que en muchos de los casos no se cuenta con equipo para proteger la integridad de la persona que la realiza, causando así daños en sus manos y en otras partes de su cuerpo.

De esta manera haciendo uso de dispositivos lógicos programables, se buscó la manera de implementar un sistema que ayude con la remoción de las espinas del nopal teniendo en cuenta que el artefacto tuviera la capacidad de disminuir el riesgo que se tiene el realizar esta tarea de forma manual representando así una ventaja para las personas dedicadas a pelar nopales.

La principal ventaja que el sistema representaría seria que la persona que hace uso de la herramienta tendría la capacidad de pelar las hojas del nopal, sin estar en contacto directo con las espinas del mismo, reduciendo significativamente el riesgo a sufrir algún tipo de lesión.

Objetivos:

- Realizar el proceso de manera más eficiente mediante la herramienta para así poder disminuir el riesgo de sufrir lesiones con las espinas del nopal.
- Hacer uso de los dispositivos digitales programables para el control del sistema.
- Realizar un prototipo funcional a escala que demuestre el funcionamiento de un posible sistema a realizar a futuro para la remoción de las espinas del nopal con los materiales adecuados.

Para poder diseñar la herramienta se realizó una investigación previa sobre las formas en las que se podían remover las espinas del nopal, encontrando que existen algunas universidades e institutos tecnológicos del país que han hecho proyectos similares, donde mediante una serie de mecanismos se busca la manera de pelar un nopal.

Buscando diversas maneras de realizar la tarea de pelar el nopal encontramos que esta puede hacerse mediante diferentes técnicas, las mismas que fueron usadas en los distintos prototipos mencionados anteriormente; algunas de las técnicas utilizaban navajas afiladas, alambres, rodillos, etc. Se encontró que una de las maneras más eficientes de eliminar espinas y ahuates del nopal era frotando el mismo por una especie de rayador similar al que es utilizado para rayar verdura, el mismo que se muestra en la figura 1.

Figura 1. Rayador de verdura

Cabe mencionar que este método de quitar espinas del nopal mediante un sistema similar al rayador de verdura no solo se utilizó en los prototipos ya realizados, sino también se encontró que de forma

manual es utilizado un método similar al quitar las espinas mediante un rayador en forma de cilindro. Como el mostrado en la figura 2.

Figura 2. Limpieza de nopal con rayador.

Por lo anteriormente mencionado se tomó la decisión de diseñar y construir unos rodillos con orificios similares a los del rayador que permitan pelar el nopal y retirar sus espinas. A continuación se realizará la descripción del prototipo realizado por parte de los alumnos de la universidad tecnológica de Nayarit.

Figura 3. Vista frontal y vista trasera.

En la figura 3 podemos observar una imagen representativa de la estructura diseñada y propuesta por los estudiantes de la universidad tecnológica de Nayarit. Donde podemos observar algunas partes muy puntuales del sistema. Como podemos observar en la figura las partes principales son:

A. **Luces indicadoras:** en la parte superior tenemos unas luces indicadoras que nos muestran los estados en los que se encuentra la operación del sistema.
B. **Caja de control:** Debajo del cartel de “pelador de nopales” se encuentra la caja de control donde está el dispositivo digital programable así como las etapas de potencia necesarias para este sistema.
C. **Parte trasera:** en la parte trasera se observa una rampa color negro la misma que servirá para retirar los nopales que estén ya limpios. En la misma parte trasera podemos observar los tornillos continuos que servirán para adaptar la estructura a diferentes grosores de nopal.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 25, pp.314 - 327, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

D. **Parte superior:** en la parte superior se encuentra una ranura, donde se debe depositar el nopal para que pueda ser limpiado.

Lo mencionado en el inciso C de los tornillos para adaptar la estructura a diferentes tamaños del grueso del nopal se pueden observar en la siguiente figura (4).

.

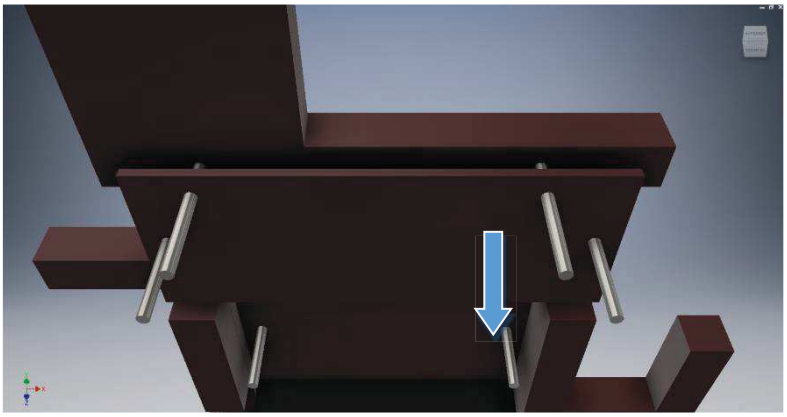


Figura 4. Ranura para entrada de nopal

Una vez definida la estructura bajo la cual se trabajaría se buscó la manera de implementar los rodillos rayadores, los mismos que serían movidos a través del nopal mediante motores. Estos fueron colocados de forma estratégica para que al pasar el nopal y accionarse los motores los rodillos presione y rayen el nopal eliminando así las espinas y ahuates del mismo.

Como parte de los componentes mecánicos y actuadores del sistema en la figura 5 se puede observar la forma en que se colocaron los motores para accionar los rodillos rayadores, cabe destacar que el giro de los motores es a favor del pase del nopal para que no le impidan pasar al nopal.

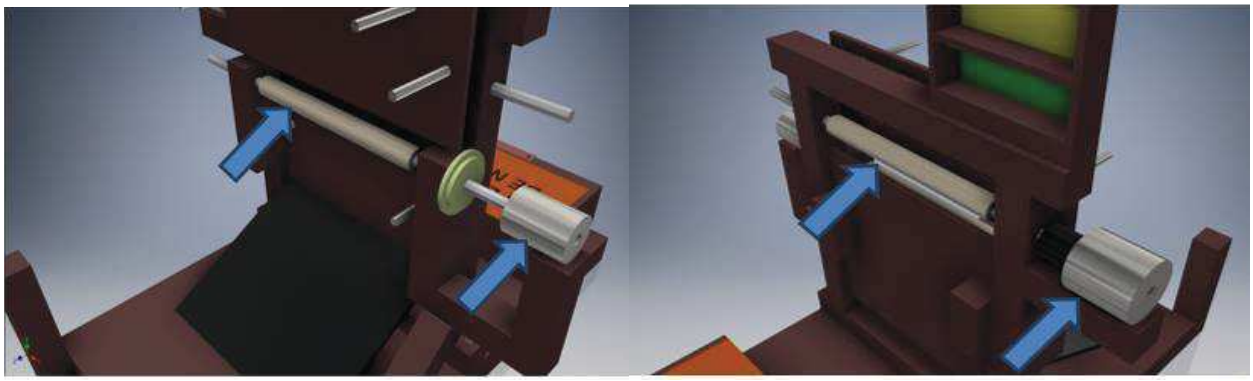


Figura 5. Rodillos y motores

Para que el sistema sea efectivo, es necesario que este cuente con una serie de sensores colocados estratégicamente, para poder detectar la entrada del nopal y el sistema solo funcione cuando se encuentre un nopal dentro de él, para así poder asegurar de que no estará en constante funcionamiento cuando el sistema no tenga presentes nopales. Los sensores se colocaron al iniciar las etapas de limpieza de cada una de las caras, tratando de que el mismo nopal al terminar de pasar por la primera etapa fuera capaz de ser censado por el siguiente sensor para continuar con la etapa de la otra cara.

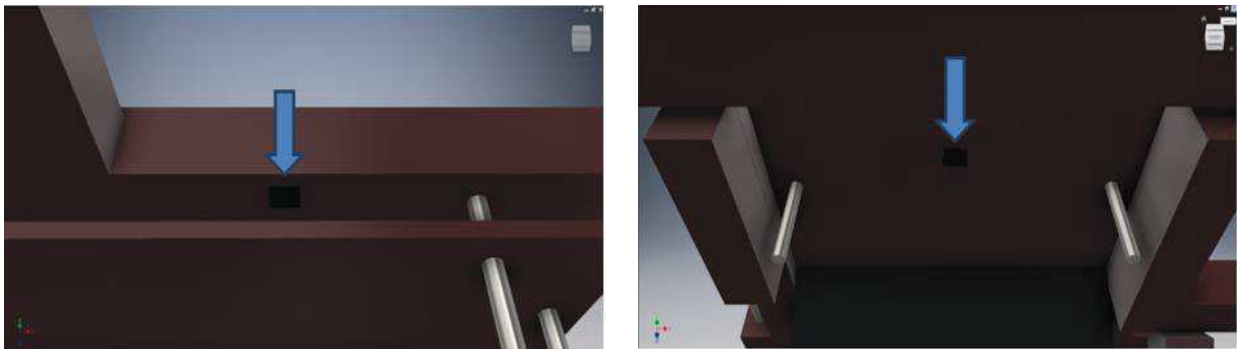


Figura 6Sensores

Además, los sensores servirán para realizar la programación del PLD y así poder llevar a cabo el control de los actuadores mencionados anteriormente, es decir los motores y los actuadores auxiliares como lo son las luces indicadoras representadas en la figura 7.

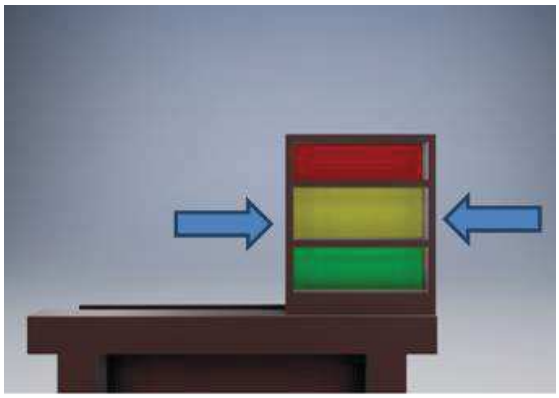


Figura 7. Luces indicadoras

Con esto pues tenemos definidos los actuadores y sensores que serían utilizados en el sistema. Cabe mencionar que además de los sensores se colocaron interruptores de arranque y paro de emergencia, que ayudarán a accionar el sistema cuando se requiera y detener el mismo en caso de ser necesario. Estos interruptores fueron colocados a la derecha de la caja de control y se muestran en la figura 8.

Figura 8. Interruptores de arranque y paro de emergencia

Programación

Como se definió anteriormente uno de los objetivos del diseño y construcción de la herramienta para remover las espinas del nopal es implementar un PLD para el control de la misma.

Una vez definidos los sensores y actuadores presentes en el sistema es necesario plantear un enunciado el cual represente y ejemplifique la problemática a resolver en cuanto a programación se refiere. Es decir, plantear los posibles casos en los cuales cada uno de los actuadores debe encender según sea la necesidad.

Para el desarrollo de la programación, una vez de definir la problemática se procedió a realizar una tabla de verdad y posteriormente obtener funciones lógicas de cada uno de los actuadores que representen el comportamiento de ellos de acuerdo a la combinación de entradas que se tenga.

Se desea realizar el control para la peladora de nopal misma que tiene la función de encender los motores y mediante ellos mover los rodillos que eliminarán las espinas del nopal. Según las entradas los motores y las luces indicadoras deben encender o apagarse. La relación entre entradas y salidas del sistema son las que se representan en la tabla 1.

Tabla 1 Entradas y salidas

ENTRADAS	SALIDAS
A= Interruptor de paro de emergencia	W= Indicador de paro (Rojo)
B= Interruptor de arranque	X= Indicador de encendido-espera(Amarillo)
C= Sensor 1	Y= indicador de activado (Verde)
D= Sensor 2	Z= encendido de motores

Este proyecto fue desarrollado en leguaje CUPL, y utilizando su compilador gratuito llamado AWINCUPL el cual el suministrado por Atmel. El lenguaje CULP es un compilador universal para diversos sistemas lógicos programables, dentro de ellos se encuentran las GAL (Generic Array Logic). En este caso en específico utilizamos la GAL16v8.

Al tener nuestras señales identificadas, realizamos la teoría del funcionamiento del sistema, el cual lo podemos resumir en lo siguiente:

- La lámpara roja enciende siempre y cuando el interruptor de paro de emergencia se encuentre activado o el sistema esté energizado, pero el interruptor de encendido no se encuentre activado.
- La lámpara amarilla enciende cuando el interruptor de encendido se activa, pero ninguno de los sensores detecta nopal presente. Esto es como en modo espera de materia prima. Es decir, se encuentra encendido el sistema pero a la espera de la presencia de nopal para operar.
- La lámpara verde y motores encienden al mismo tiempo los 3 elementos, cuando el interruptor de paro de emergencia se encuentre desactivado, el interruptor de encendido se encuentre activado y además de esto alguno de los dos sensores detecta la presencia de nopal.

Con este procedimiento de funcionamiento definido realizamos la tabla de verdad (Tabla 2) en la cual establecemos todas las variables que tenemos (entradas y salidas), en la cual en las entradas declaramos todas las posibles combinaciones que podrían existir entre ellas y en la parte de las salidas declaramos que es lo que queremos que se active o desactive con cada una de las combinaciones de las entradas.

Tabla 2: Tabla de verdad

TABLA DE VERDAD							
A	B	C	D	W	X	Y	Z
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	0	0
0	1	0	1	0	1	0	0
0	1	1	0	0	1	1	1
0	1	1	1	0	1	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0
1	0	0	1	1	0	0	0
1	0	1	0	1	0	0	0
1	0	1	1	1	0	0	0
1	1	0	0	1	0	0	0
1	1	0	1	1	0	0	0
1	1	1	0	1	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0

ENTRADAS
A= Interruptor de paro de emergencia
B= Interruptor de arranque
C= Sensor 1
D= Sensor 2

SALIDAS
W= Indicador de paro (Rojo)
X= Indicador de encendido-espera(Amarillo)
Y= indicador de activado (Verde)
Z= encendido de motores

La tabla 2 hace uso de las variables antes definidas en la tabla1. Como podemos observar la tabla 2 se llenó con las posibles combinaciones de entradas que podemos tener y así mismo se

determinó el funcionamiento de cada uno de los elementos de salida, de acuerdo a la combinación de entrada.

Después de obtener esta tabla completamente llena, se obtuvieron las funciones de cada una de las salidas, se pueden obtener las funciones de manera manual en la cual solo se escribe la combinación de las entradas en donde se tenga un 1 en la salida, con esto lo que obtenemos es saber con qué combinaciones se activa la salida, otra opción para obtener las funciones es utilizar los mapas de Karnaugh los cuales son una herramienta que se utiliza para simplificar una ecuación lógica o para convertir una tabla de verdad en su circuito lógico correspondiente en un proceso simple y ordenado. [4] A continuación, se muestran las funciones obtenidas para cada una de las salidas de nuestro sistema.

- **Indicador de paro:** W=A
- **Indicador de espera:** X= A'B
- **Indicador de encendido:** Y= A'BCD'
- **Motores:** Z= A'BCD'

A continuación, se muestra la programación utilizada para nuestro pelador de nopales, en la cual se incluye el encabezado, declaración de pines y los comandos de procesado o las funciones. Donde se puede observar las 3 partes principales del programa tales como configuración, declaración de entradas/salidas y funciones lógicas.

```
Name     Nopales ;
Date     25/10/2018;
Designer Engineer ;
Assembly None ;
Device   g16v8;

/* *************** INPUT PINS *********************/
PIN   2  =  d                    ; /*                          */
PIN   3  =  c                    ; /*                          */
PIN   4  =  b                    ; /*                          */
PIN   5  =  a                    ; /*                          */

/* *************** OUTPUT PINS *********************/
PIN   19  =  w                    ; /*                          */
PIN   18  =  x                    ; /*                          */
PIN   17  =  y                    ; /*                          */
PIN   16  =  z                    ; /*                          */

w = (!b#a);
x = (!a&b&!c&!d);
y= (!a&b&d)#(!a&b&c);
z= (!a&b&d)#(!a&b&c);
```

WIMCUPL al compilar la programación nos genera un archivo.jed, este es el que posteriormente cargaremos a nuestra GAL con ayuda de otro software y un quemador de PLD´S.

Integración del sistema y pruebas de funcionalidad

Las primeras pruebas se realizaron con ayuda de un simulador llamado PROTEUS, en el cual realizamos la conexión de las entradas y salidas en la GAL16v8, dentro de este simulador se logró cargar la programación realizada en WINCUPL a la GAL utilizando el archivo. Jed antes mencionado.

Los interruptores y sensores de entrada fueron sustituidos por elementos los cuales simulan un estado lógico. Las salidas fueron led, en la cual tres de los leds simulan los indicadores que se utilizaron y otra salida para accionar el relevador haciendo funcionar los motores.

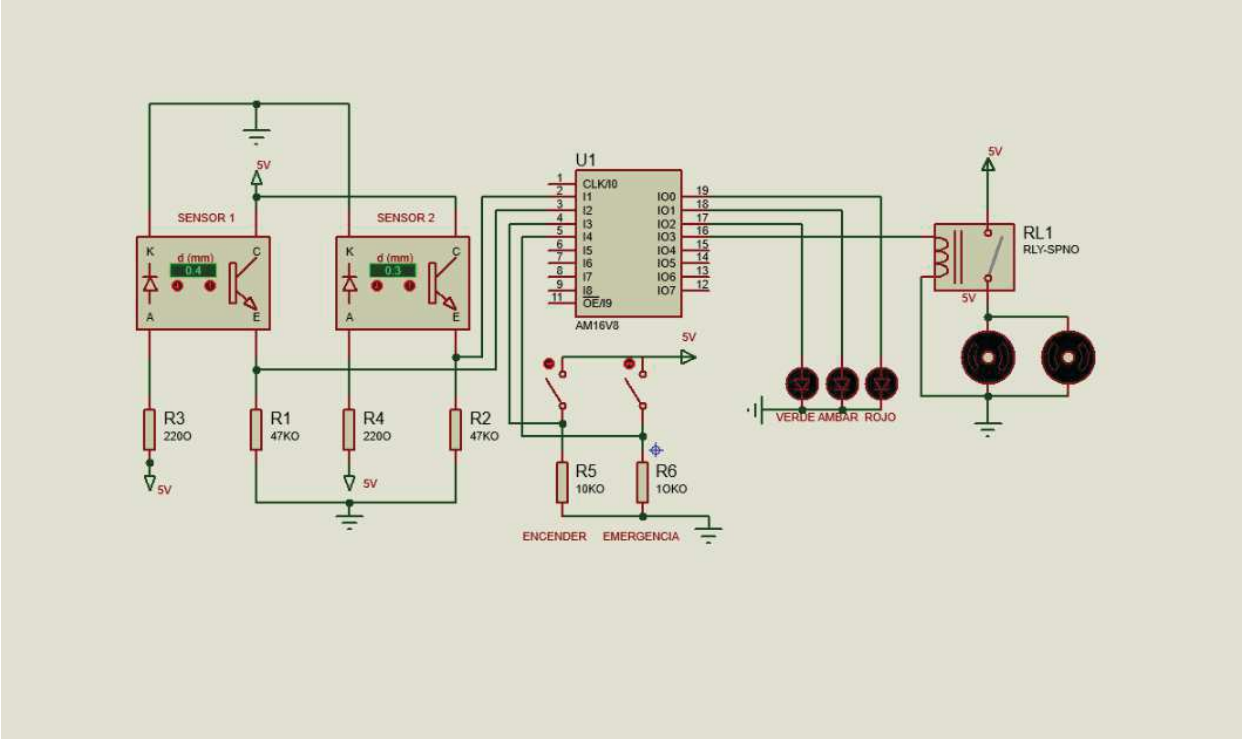


Figura 9. Diagrama de conexión

En la imagen (figura 9), podemos observar la simulación realizada, así como la conexión en diagrama electrónico para conocer cómo se encuentra constituida esta máquina encargada de pelar nopales.

Por ultimo al tener el PLD cargado con la programacion que se desarrolló para satisfacer la necesidad de la peladora de nopal, se implementó la misma en el prototipo y por ultimo se realizaron las pruebas de funcionamiento del prototipo.

Figura 10. Prototipo propuesto

Como podemos observar en la figura 10 este fue el resultado del prototipo que se desarrolló. El funcionamiento de este prototipo seria el siguiente:

- Una vez que esté energizado el sistema y se tenga como estado inicial los interruptores desactivados la lámpara roja estará encendida por lo tanto los motores no encenderían en ningún momento.

- Una vez que se active el interruptor de encendido, suceden dos cosas mientras esté se encuentra activado, una de ellas es que mientras ninguno de los dos sensores detecte la presencia de nopal los motores estarán apagados y el led ámbar estará encendido. Pero cuando uno de los sensores detecta un nopal, la lámpara ámbar se apaga, la lámpara verde se enciende y los motores empiezan a trabajar.
- Por ultimo cabe mencionar que el interruptor de emergencia es el encargado de parar todo el sistema en otras palabras, apaga los motores y enciende la lámpara roja.

3. Resultados

Al concluir el desarrollo del prototipo se pudo observar que algunos de los objetivos fueron correctamente cumplidos en cierta medida. Podemos mencionar que este proyecto cumplió con el objetivo principal el cual es pelar o retirar las espinas que tienen las hojas de nopal de una manera segura para el operador. Con el simple hecho de que la persona solo lo tome y lo inserte en la entrada del sistema, el cual se encarga del resto que es pasarlo por los rodillos mismos que al girar hacen que el nopal avance y a su vez comienza a retirar las espinas que tiene.

Otro de los objetivos planteados al inicio del desarrollo de la peladora de nopal fue el de realizar un prototipo funcional a escala que demostrara el funcionamiento de un posible sistema a realizar a futuro con lo que este objetivo fue alcanzado puesto que el prototipo que se desarrolló representa eficazmente a escala una posible herramienta a mayor a escala que podría desarrollarse para realizar

la actividad de remoción de espinas del nopal en mayor número puesto que el prototipo que se presentó si sirve para realizar esta actividad pero a una escala pequeña.

Por otro lado, otro de los objetivos que se buscó lograr fue el de implementar un dispositivo lógico programable para el control de algún sistema físico real que satisficiera una actividad productiva. Donde pudimos darnos cuenta que los dispositivos PLD's pueden ser una alternativa para el control de algunos sistemas combinacionales y/o secuenciales y estos dispositivos pueden remplazar a otros microcontroladores que son más populares, pero a su vez pueden ser más costosos. Además, no siempre es necesario utilizar componentes tan sofisticados para algunas tareas, un PLD puede realizar el control de alguna problemática de lógica digital sin ningún problema

Discusión

Si hacemos una comparativa con las maquinarias antes investigadas mismas que fueron mencionadas en el apartado introductorio, nos podemos percatar que ninguna de ellas utilizo ningún tipo de sensor o microcontrolador para automatizar el proceso, puesto que su proceso era totalmente mecánico.

Figura 11. Antecedentes-Prototipos

Por otra parte, el prototipo desarrollado hace uso de los PLD, estos permiten controlar el sistema de acuerdo a la lógica booleana dependiendo de la combinación de entrada que se tenga.

Otros de los puntos a tomar en cuenta como desventaja a las otras máquinas ya existentes en el mercado, es que se encontró el problema con los nopales principalmente cuando estos se encuentran de manera curveada. Dichas curvas son muy pronunciadas nuestras herramientas (rodillos) con las cuales se eliminan las espinan no tienen la capacidad de entrar en esa superficie curva. Y se ha observado que otros prototipos tienen la capacidad de pelar nopales que sean curvos también.

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. El prototipo utiliza el principio de funcionamiento de una serie de rodillos que jalan el nopal y lo hacen pasar por una cuchilla que corta las espinas. Desespina solo una cara por paso. [5]

Con respecto al prototipo presentado por la escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica podemos decir que nuestro sistema es similar puesto que también utiliza unos rodillos para jalar el nopal, pero además para retirar las espinas y la ventaja que nuestro prototipo tiene es que

remueve las espinas de las dos caras por cada nopal, es decir no hay que introducir el nopal dos veces al sistema.

Además, se puede mencionar que el tamaño de nuestro prototipo frente a los demás es mucho más pequeño puesto que los otros con el simple hecho de utilizar motores de CA ya representan un tamaño considerable en el prototipo.

Se comprobó que el prototipo es funcional a comparación de algunos de los investigados y resuelve la problemática para la que fue diseñado, así mismo se puede mencionar que al recrear el prototipo de a mayor escala se obtendrán mejores resultados puesto que se utilizarán materiales adecuados, así como también uso de los motores correspondientes para esta tarea los cuales deben ser motores de mayor potencia ya que las en los prototipos de otras universidades e institutos tecnológicos se tiene el apoyo de patrocinadores para la construcción de sus prototipos.

Nuestro sistema propuesto de pelado de nopales tiene una torreta de luz a comparación de los prototipos puestos como comparativa, y gracias a la torreta podemos ver en qué estado se encuentra el proceso.

4. Conclusiones

La diferencia en el avance de nuestro prototipo a comparación de los mencionados en la investigación realizada se vio una gran mejoría en comparación de costos y de productividad, ya que nuestra peladora de nopales tiene un diseño sencillo, práctico y fácil de utilizar.

Se observó que el contexto local, así como el nacional existen diversas tareas que pueden ser mejoradas y apoyadas por medio de herramientas de este tipo que ayudarían a realizar tareas tediosas y en algunos de los casos peligrosas de una manera más segura y eficaz.

En el desarrollo de este prototipo se utilizaron componentes electrónicos que nos permitieron controlar el sistema de una manera muy sencilla y de bajo costo permitiendo así comunicar los componentes para hacer la peladora de nopal un sistema automatizado con bajos recursos.

De la misma manera cabe mencionar que el sistema presentado es un prototipo el cual permite realizar la tarea de quitar las espinas, pero de requerirse tener este artefacto dentro de un establecimiento deberá mejorarse. Dichas mejoras pueden ser en el material con el cual se debe construir puesto que debe ser un material como el acero inoxidable o aluminio que garantice que el proceso pueda realizarse de manera más higiénica y a su vez sea fácil de limpiar. También una de las mejoras que puede tener el prototipo serían las herramientas con las que realiza la remoción de las espinas, mismas que deben realizarse con material de acero que nos de la seguridad que mantendrá el filo por un tiempo más prolongado que el PVC con el que se encuentra construida la de nuestro prototipo. Otra mejora sería el reemplazar los motores pequeños por motores de mayor potencia que realicen de mejor manera el trabajo del pelado del nopal.

Podemos finalizar diciendo que, aunque los dispositivos lógicos programables como los PLD son poco populares para este tipo de aplicaciones, pero se pueden utilizar para realizar estos procesos para ejecutarse de una manera rápida y fácil y con un menor costo que otros dispositivos de control.

Referencias

[1] Morales, M. (19 de Febrero de 2014). Fabrican en Tlaltelulco primera máquina desespinadora de nopal. *El sol de Tlaxcala* .

[2] Reyes, M. G. (2012). Prueba y evaluación de maquinas. *FUNDACION PRODUCE - CATALOGO DE TECNOLOGIAS ADOPTADAS* , 3.

[3] Treviño, J. A. (2013). *Nopalea*. Obtenido de www.sabiladavila.com.mx

[4] Moreno, A. A. (2013). Sistemas digitales-Mapas de Karnaught. *UNIVERSIDAD DON BOSCO-FACULTAD DE ESTUDIOS TECNOLOGICOS Y ELECTRONICOS*, 1.

[5] Hernandez, M. G. (06 de 20 de 2013). Máquina desespinadora de tunas y nopales. *UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE*, pág. 45.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 26, pp.328 - 340, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Uso de Tarjeta de Desarrollo Raspberry Pi para Simulación de Sistemas Mecatrónicos No Lineales

Torres del Carmen Felipe de Jesús[(1)], Arredondo Martínez Monserrat Sugey[(1)], Rueda Martínez Norman Alejandro[(1)] y Martínez Olmos Juan Manuel[(2)]

([1]) Universidad de Guanajuato. División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca. Carretera Salamanca-Valle de Santiago, km. 3.5 + 1.8, Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Gto. C.P. 36885
([2]) Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Av. Palmira S/N, colonia Palmira. Cuernavaca, Morelos.
Correo de contacto: fdj.torres@ugto.mx

Resumen

Este artículo presenta una propuesta de alternativa para simular sistemas mecatrónicos no lineales en la enseñanza de la ingeniería a través del uso de dispositivos de bajo costo. Los equipos de cómputo, comúnmente utilizados para las simulaciones, requieren de gran capacidad de hardware para soportar el software de simulación. Aunado a esto, el software de simulación en la mayoría de los casos, son bajo licencia. Por tanto, el costo de implementar un laboratorio de simulación en una universidad pública es muy alto. Así, se muestra una alternativa de usar una tarjeta de desarrollo comercial Raspberry Pi, con el software GNU-Octave de licencia libre, para simular sistemas mecatrónicos no lineales como un robot SCARA de 4 grados de libertad y un péndulo invertido rotacional. La comparación de los modelos mecatrónicos simulados, tanto en software comúnmente utilizado como en el software libre propuesto, exhiben la viabilidad de la alternativa presentada.

Palabras clave: Raspberry Pi, GNU-Octave, Sistemas mecatrónicos no lineales.

1. Introducción

Las estrategias de enseñanza-aprendizaje en la educación superior actual, están relacionadas cada vez más con el uso de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC). Particularmente, en la enseñanza de la Ingeniería en Mecatrónica es necesario utilizar equipos de cómputo para realizar simulaciones de diversa índole. Por ejemplo, en cursos como Sistemas de Control, Sistemas Dinámicos, Robótica, Ecuaciones Diferenciales, Matemáticas Avanzadas, entre otras, se llevan a cabo simulaciones de sistemas mecatrónicos lineales y no lineales.

En varias de las universidades públicas del país donde se imparte la licenciatura en Ingeniería Mecatrónica requieren de la puesta en marcha de un laboratorio de simulación para que el estudiante pueda realizar las simulaciones de los sistemas no lineales tratados en el aula. Para el funcionamiento adecuado del laboratorio de simulación, el equipo de cómputo a utilizar debe cumplir, generalmente, con gran capacidad de hardware para soportar los softwares de simulación especializados. Estas computadoras por tanto son de tamaño grande y costosas. Otra problemática que afrontan los administrativos de las escuelas públicas es la compra de licencia de los softwares de simulación, las cuales son igualmente costosas y están en función de la cantidad de equipos de cómputo donde serán instaladas, además de tener una vigencia finita, lo cual representa un gasto periódico.

Existen otro tipo de software denominado software libre, el cual es un movimiento que se ha gestado desde principios de los 70's, derivado del posicionamiento de las grandes empresas de empezar a vender los softwares que producían. Aunque fue hasta principios de los 80's cuando el movimiento de software libre inició a producir sus propios softwares, los cuales estaban bajo una

licencia pública denominada GPL (General Public License, por sus siglas en inglés). En [1] expresa que ésta licencia protegía al software desarrollado a partir del movimiento de software libre, otorgándole las libertades de:

- Usar el software para cualquier propósito.
- Estudiar cómo funciona el software y adaptarlo a las necesidades propias.
- Distribuir libremente copias del software.
- Mejorar el software y hacer públicas las versiones mejoradas en beneficio de la comunidad.

Las ventajas de utilizar software libre están basadas en el costo de la licencia que se elimina completamente, respecto a un software de simulación especializado. Más aún, si éste software libre es instalado en una minicomputadora o bien, una tarjeta de desarrollo comercial como la Raspberry Pi, la cual tiene un costo 20 veces menor al costo de una computadora personal comúnmente usada para simulación.

Sin embargo, la problemática de utilizar software libre para simulación de sistemas dinámicos no lineales se centra en que la información disponible en la literatura para el proceso de enseñanza-aprendizaje, está en función del uso de software especializado como Matlab™. Así por ejemplo en [2] se presenta una guía de simulación de sistemas dinámicos lineales con Matlab™. En [3] se modelan sistemas fotovoltaicos usando Matlab™. En [4] se simulan sistemas de energías renovables a través de Matlab™. En [5] trata acerca de aplicaciones de la ingeniería en sistemas de control con Matlab™.

Por tanto, el objetivo del artículo es simular sistemas mecatrónicos no lineales en software libre soportado en una minicomputadora o tarjeta de desarrollo como Raspberry Pi para mostrar evidencia de una alternativa de simulación en la enseñanza de la Ingeniería Mecatrónica.

El artículo se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta la descripción del software GNU-Octave y de la Raspberry Pi. En la sección 3 se muestran los modelos dinámicos no lineales de los sistemas mecatrónicos: robot SCARA y péndulo invertido rotacional. En la sección 4, se exhiben los resultados de las simulaciones realizadas en el software comúnmente usado, Matlab™ y el software libre propuesto. Por último, en la sección 5 se dan las conclusiones del documento.

2. Descripción de GNU-Octave y Raspberry Pi.

2.1 GNU-Octave.

GNU-Octave es un software libre redistribuible, lo cual permite ser modificado bajo los términos del GNU General Public License (GPL). Es un lenguaje de alto nivel para cálculo numérico. Permite la solución numérica de problemas lineales y no lineales. Provee extensas capacidades gráficas para visualización y manipulación de datos. Se usa a través de su línea de comandos interactivos o bien de códigos. El lenguaje Octave es bastante similar a Matlab™ de tal manera que la mayoría de los programas son portables. En la figura N° 1 se observa la pantalla principal del software GNU-Octave.

2.2 Raspberry Pi.

Raspberry PI® (RPi) es una mini-computadora en placa, de tamaño de una tarjeta de crédito, desarrollada en Reino Unido por la fundación Raspberry Pi con la intención de estimular la enseñanza de las ciencias computacionales básicas en escuelas [6]. La fundación provee Debian y Python como lenguajes de programación principal, sin embargo, es posible instalar sistemas operativos en base a Linux o incluso Windows® 10. El bajo costo y la configuración de hardware de la placa RPi han hecho que sea muy popular entre los programadores y realizadores (aficionados) de proyectos de automatización que requieren algún procesamiento computacional. Está integrada por un chip Broadcom BCM2835 con procesador ARM hasta 1.4 GHz de velocidad, GPU VideoCore IV y hasta 1 GB de memoria RAM.

Se requiere de un medio de almacenamiento, tarjetas de memoria SD o microSD, así como de un cargador microUSB de al menos 2000mAh. Contiene un puerto de salida de video HDMI y otro de tipo RCA, minijack de audio y un puerto USB 2.0 (modelos A y A+, B dispone de dos USB y B+ y Raspberry Pi 2 disponen de 4 USB) con el que se podrá conectar periféricos como teclado y ratón. Para conexión en red, la RPi contiene un puerto Ethernet o es posible utilizar un adaptador inalámbrico WiFi compatible. El esquema de una RPi es mostrada en la figura N° 2.

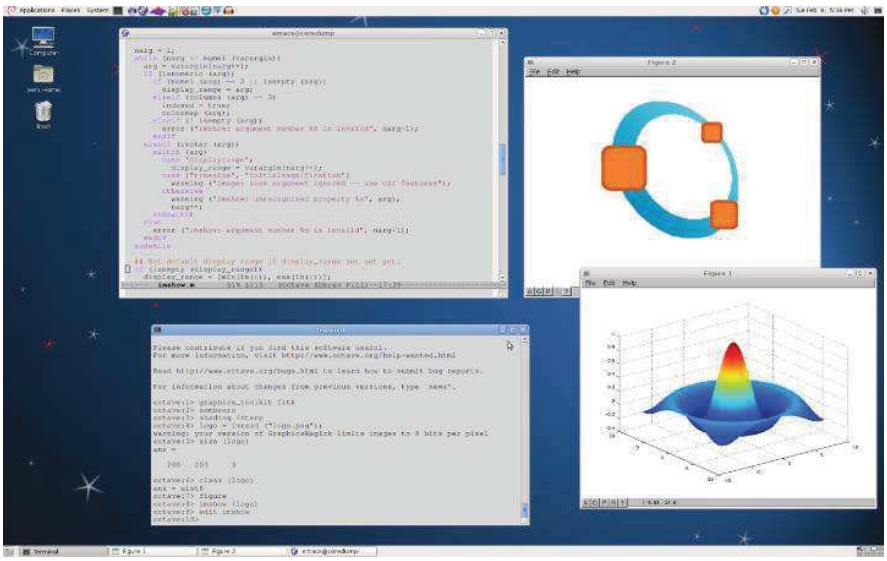


Figura 1. Pantalla principal del software de licencia libre GNU Octave.

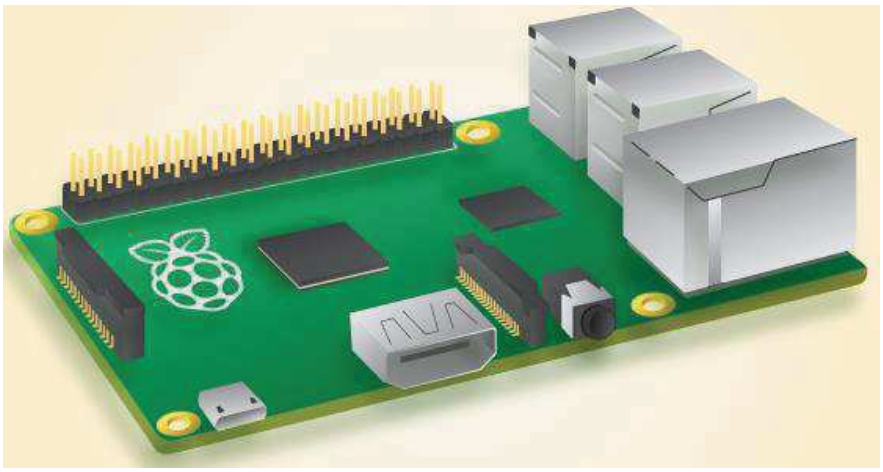


Figura 2. Esquema de la Raspberry Pi B+.

3. Modelos dinámicos de sistemas mectrónicos no lineales.

3.1 Modelo dinámico del robot SCARA.

El robot SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm, por sus siglas en inglés) es un brazo robótico de configuración revoluta (rotacional o de pasador) horizontal en sus articulaciones q_1, q_2 y q_3, como se observa en la figura N° 3. Fue diseñado en Japón y desempeña tareas de tipo "tomar y poner", por lo que es útil en líneas de ensamble.

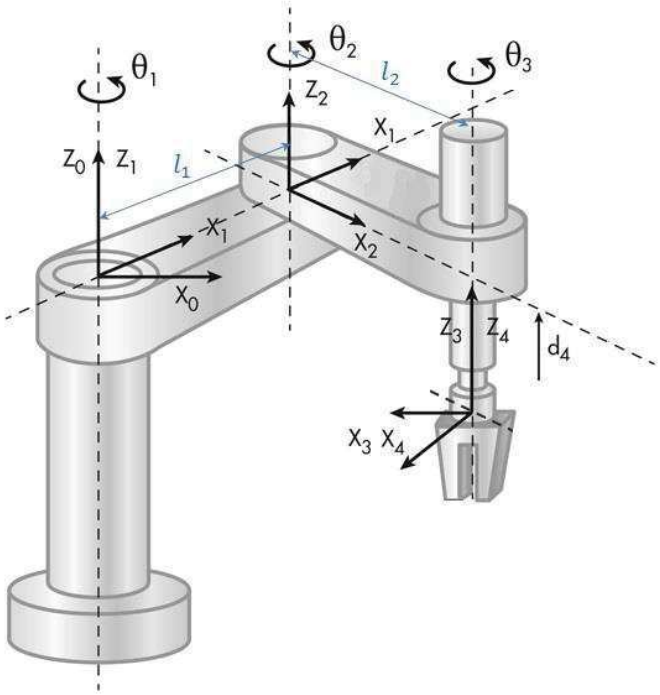


Figura 3. Robot manipulador SCARA.

Se considera un robot manipulador rígido completamente actuado, despreciando las pérdidas por fricción, con $i = 1, 2, \cdots, n$ articulaciones, donde $n = 4$. Los vectores de coordenadas generalizadas de las articulaciones del robot son $q_i \in \mathbb{R}^n$, bajo las siguientes características:

Los eslabones 1, 2 y 3 tienen un movimiento rotacional. Sus posiciones angulares θ_1, θ_2 y θ_3 serán las coordenadas generalizadas q_1, q_2 y q_3, respectivamente. El desplazamiento vertical d_4 d_4 del efector final, será la coordenada generalizada q_4. Los movimientos q_1, q_2 y q_3 se desarrollan en el plano horizontal, por lo cual se desprecia la energía potencial $U(q_i)$ en ellos. La articulación 3 mueve las masas m_3 y m_4, así mismo se suman las inercias I_3 e I_4.

Usando el formulismo de Euler-Lagrange, el modelo dinámico del robot, en su representación matricial, es dado por:

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + B_i\dot{q}_i + g_i(q_i) = \tau_i \tag{1}$$

Donde $M_i(q_i) \in \mathbb{R}^n$ es la matriz de inercias, $C_i(q_i, \dot{q}_i) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de Coriolis y fuerzas centrífugas, B_i es una matriz diagonal de los coeficientes de fricción viscosa de cada articulación, $g_i(q_i) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de fuerzas gravitacionales, $\tau_i \in \mathbb{R}^n$ es el vector de torques o pares de entrada. De manera detallada,

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \\ \ddot{q}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ m_4 g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde:

$$M_{11} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + m_1 lc_1^2 + m_2 l_1^2 + m_2 \left(lc_2^2 + 2 l_1 lc_2 \cos q_2 \right) + \left(m_3 + m_4 \right) \left(l_1^2 + l_2^2 + 2 l_1 l_2 \cos q_2 \right)$$

$$M_{12} = I_2 + I_3 + I_4 + m_2 \left(lc_2^2 + l_1 lc_2 \cos q_2 \right) + \left(m_3 + m_4 \right) \left(l_2^2 + l_1 l_2 \cos q_2 \right)$$

$$M_{13} = M_{23} = M_{33} = I_3 + I_4$$

$$M_{14} = M_{24} = M_{34} = 0$$

$$M_{22} = I_2 + I_3 + I_4 + m_2 lc_2^2 + \left(m_3 + m_4 \right) l_2^2$$

$$M_{44} = m_4$$

$$C_{11} = -m_2 l_1 lc_2 \sin q_2 \dot{q}_2 - \left(m_3 + m_4 \right) l_1 l_2 \sin q_2 \dot{q}_2$$

$$C_{12} = -m_2 l_1 lc_2 \sin q_2 \left(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 \right) - \left(m_3 + m_4 \right) l_1 l_2 \sin q_2 \left(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 \right)$$

$$C_{21} = m_2 l_1 lc_2 \sin q_2 \dot{q}_1 + \left(m_3 + m_4 \right) l_1 l_2 \sin q_2 \dot{q}_1$$

$$C_{13} = C_{14} = C_{22} = C_{23} = C_{24} = C_{31} = C_{32} = C_{33} = C_{34} = C_{41} = C_{42} = C_{43} = C_{44} = 0$$

Este modelo obtenido fue comparado con los modelos dinámicos presentados en [7] y [8], los cuales son similares en función del orden de las coordenadas generalizadas.

3.2 Modelo dinámico del péndulo invertido rotacional.

En base a [9], el modelo dinámico del péndulo invertido rotacional, mostrado en la figura N° 4, se obtiene mediante las ecuaciones de Euler – Lagrange.

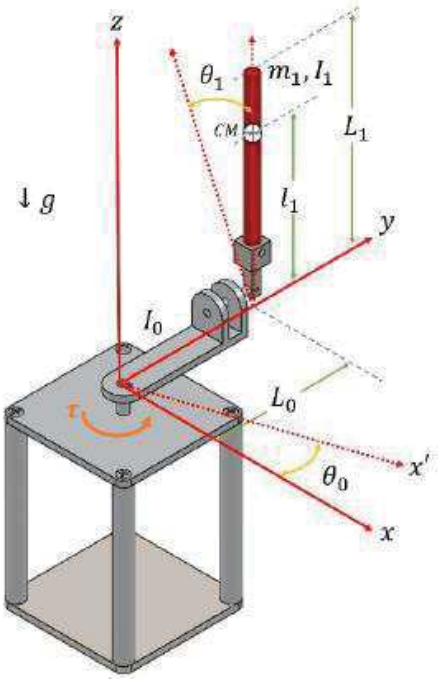


Figura 4. Péndulo invertido rotacional.

Debido a que el sistema tiene dos grados de libertad, las ecuaciones diferenciales que representan la dinámica del sistema tienen la siguiente forma:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_0}\right)-\frac{\partial L}{\partial \theta_0}=\tau \tag{3}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1}\right)-\frac{\partial L}{\partial \theta_1}=0 \tag{4}$$

Donde τ es el par del motor y L es el lagrangiano.

Este último, está definido como: $L=K_T-U_T$, el cual se refiere a la diferencia de la energía cinética total y la energía potencial total del sistema.

Por lo que, como primera instancia se requiere realizar el cálculo de la energía total tanto cinética como potencial del sistema. La energía cinética consiste de la componente traslacional y rotacional del péndulo y de la componente rotacional del brazo. Por otro lado, el sistema solo almacena energía potencial en el péndulo ya que el brazo, al tener movimiento rotacional en el plano horizontal, no presenta un cambio de altura en su centro de masa. Las ecuaciones resultantes son:

$$K_T=K_0+K_1=\frac{1}{2}I_0\dot{\theta}_0^2+\frac{1}{2}I_1\dot{\theta}_1^2+\frac{1}{2}m_1\left(L_0^2\dot{\theta}_0^2+l_1^2\left(\dot{\theta}_1^2+\dot{\theta}_0^2\sin^2\theta_1\right)+2L_0l_1m_1\dot{\theta}_0\dot{\theta}_1\cos\theta_1\right) \tag{5}$$

$$U_T=m_1gl_1\left(\cos\theta_1-1\right) \tag{6}$$

Por lo tanto, el lagrangiano es dado por:

$$L=\frac{1}{2}I_0\dot{\theta}_0^2+\frac{1}{2}I_1\dot{\theta}_1^2+\frac{1}{2}m_1\left(L_0^2\dot{\theta}_0^2+l_1^2\left(\dot{\theta}_1^2+\dot{\theta}_0^2\sin^2\theta_1\right)+2L_0l_1m_1\dot{\theta}_0\dot{\theta}_1\cos\theta_1\right)+m_1gl_1\left(1-\cos\theta_1\right) \tag{7}$$

De las ecuaciones (3) y (4) se obtienen las ecuaciones de movimiento:

$$I_0\ddot{\theta}_0+L_0^2m_1\ddot{\theta}_0+l_1^2m_1\left(\ddot{\theta}_0\sin\theta_1+2\dot{\theta}_0\dot{\theta}_1\sin\theta_1\cos\theta_1\right)+L_0l_1m_1\left(\ddot{\theta}_1\cos\theta_1-\dot{\theta}_1^2\sin\theta_1\right)=\tau \tag{8}$$

$$I_1\ddot{\theta}_1+l_1^2m_1\ddot{\theta}_1+L_0l_1m_1\ddot{\theta}_0\cos\theta_1-l_1^2m_1\dot{\theta}_0^2\sin\theta_1\cos\theta_1-m_1gl_1\sin\theta_1=0 \tag{9}$$

Así, (8) es la ecuación del movimiento del brazo y (9) del péndulo.

4. Comparación de Simulación en MatlabTM y GNU-Octave.

De manera general, las simulaciones son llevadas a cabo como un sistema de lazo abierto, donde el usuario introduce los pares de entrada que desee, éstos pares actúan sobre el modelo dinámico no lineal del robot SCARA o del Péndulo Invertido Rotacional. El software de simulación, sea Matlab™ o GNU-Octave resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales a través de una doble integración para obtener la posición angular de la articulación. El esquema de simulación es visto en la figura N° 5.

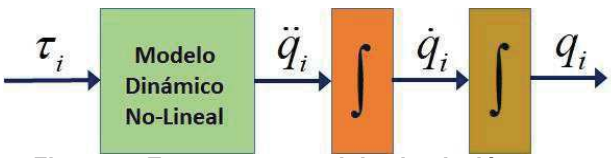


Figura 5. Esquema general de simulación.

4.1 Simulación del Robot SCARA.

Se considera un robot manipulador de 4 grados de libertad tipo SCARA, utilizando el modelo dinámico (2). Los parámetros del robot SCARA don dados en la tabla N° 1.

Tabla 1. Parámetros del robot SCARA.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
m_1	$15\ kg$	l_1	$0.50\,m$
m_2	$12\ kg$	l_2	$0.40\,m$
$m_3 = m_4$	$3\ kg$	lc_1	$0.25\,m$
I_1	$0.02\,m_1$	lc_2	$0.20\,m$
I_2	$0.08\,m_2$	I_3	$0.05\,m_3$
I_4	$0.002\,m_4$	g	$9.81\frac{m}{s^2}$
B_i	$0.5\frac{N\cdot s}{m}$		

Simulación en Matlab™

Para realizar la simulación en Matlab™ se utilizó de la plataforma Simulink®, codificación de la S-Function, solucionador ode45 paso variable, con un tiempo de simulación de 10 segundos y condiciones iniciales a cero. El esquema en Simulink®, mostrado en la figura N° 6, es sencillo en apariencia, lo importante es el código de la S-Function, el cual se detalla en el anexo a. Dentro del esquema de simulación se ha incluido un bloque q_dq que guarda el contenido de las variables de cada integración, en una estructura de arreglo con tiempo. Esta variable es usada para crear las gráficas correspondientes.

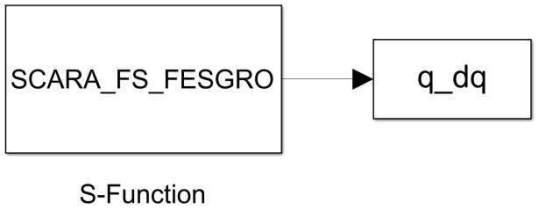


Figura 6. Esquema general de simulación.

Así, en la figura N° 7 se presenta el desplazamiento y velocidad angular para cada articulación del robot SCARA sometido a los pares siguientes:

$$\tau_i = \begin{bmatrix} 3 \\ 2 \\ 0 \\ 30 \end{bmatrix} N\cdot m \tag{10}$$

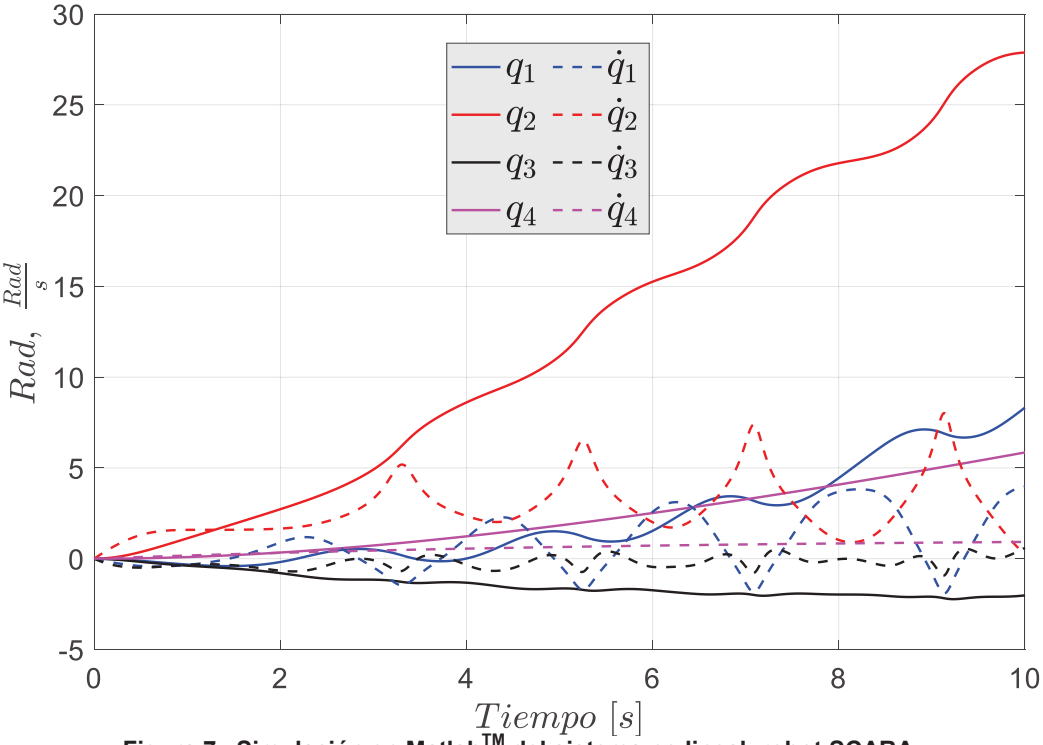


Figura 7. Simulación en Matlab™ del sistema no lineal: robot SCARA.

Simulación en GNU-Octave

El procedimiento para llevar a cabo la simulación en GNU-Octave ha sido desarrollado de la siguiente manera:

i) Codificar una función que se ha denominado projectile, conteniendo:
   (1) Los parámetros del robot.
   (2) Los pares de entrada al sistema.
   (3) Las ecuaciones diferenciales matriciales del modelo (2).
   (4) Formar el vector de segundas y primeras derivadas que serán resueltas (integradas) por el solucionador elegido.

ii) Crear un código que llame a la función projectile, éste código establece:
   (1) Condiciones iniciales.
   (2) Tiempo de simulación.
   (3) Elección del solucionador.
   (4) Propiedades del solucionador.
   (5) Líneas de código para la creación de la gráfica correspondiente.

Estos códigos pueden ser analizados en el anexo b. Para realizar adecuadamente la comparación, en GNU-Octave se eligió el solucionador ode45 y un tiempo de simulación de 10 segundos, al igual que la simulación realizada en Matlab™. La gráfica que GNU-Octave arroja es vista en la figura N° 8.

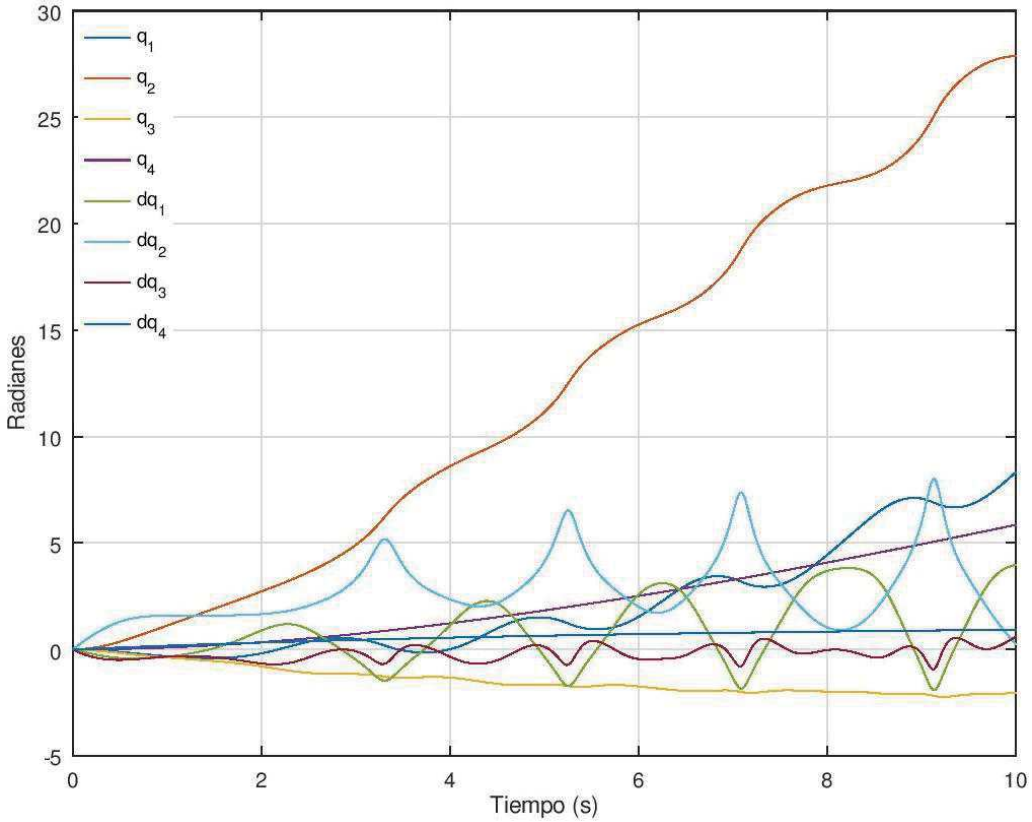


Figura 8. Simulación en GNU-Octave del sistema no lineal: robot SCARA.

4.2 Simulación del Péndulo Invertido Rotacional.

Utilizando el mismo procedimiento que se empleó en la simulación del robot SCARA, para la simulación del Péndulo Invertido Rotacional se utilizó el solucionador ode45, así como un tiempo de simulación de 5 segundos y condiciones inciales puestas a cero. Tanto para las simulaciones en Matlab™ como en GNU-Octave.

Los parámetros del péndulo invertido rotacional utilizados en el modelo de las ecuaciones diferenciales (8) y (9), son dados en la tabla N° 2.

Tabla 2: Parámetros del péndulo invertido rotacional.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
m_1	$0.2866\,kg$	L_0	$0.201\,m$
L_1	$0.30997\,m$	l_1	$0.15498\,m$
I_0	0.0052	I_1	0.0023

Los resultados de cada una de las simulaciones se visualizan a través de las figuras N° 9 y N° 10.

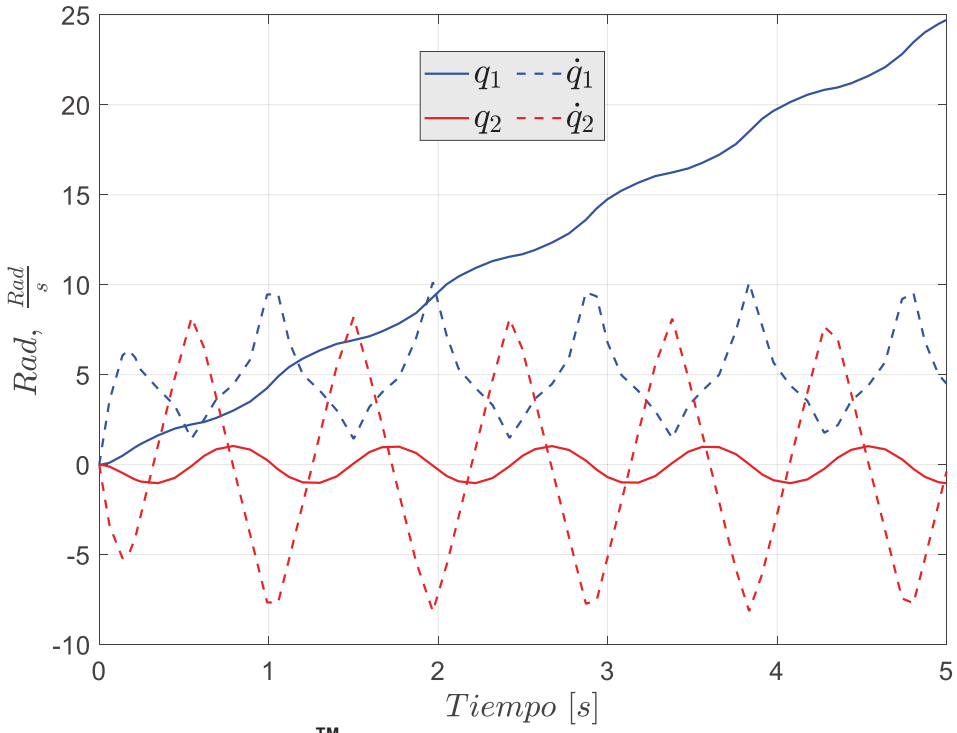


Figura 9. Simulación en Matlab™ del sistema no lineal: péndulo invertido rotacional.

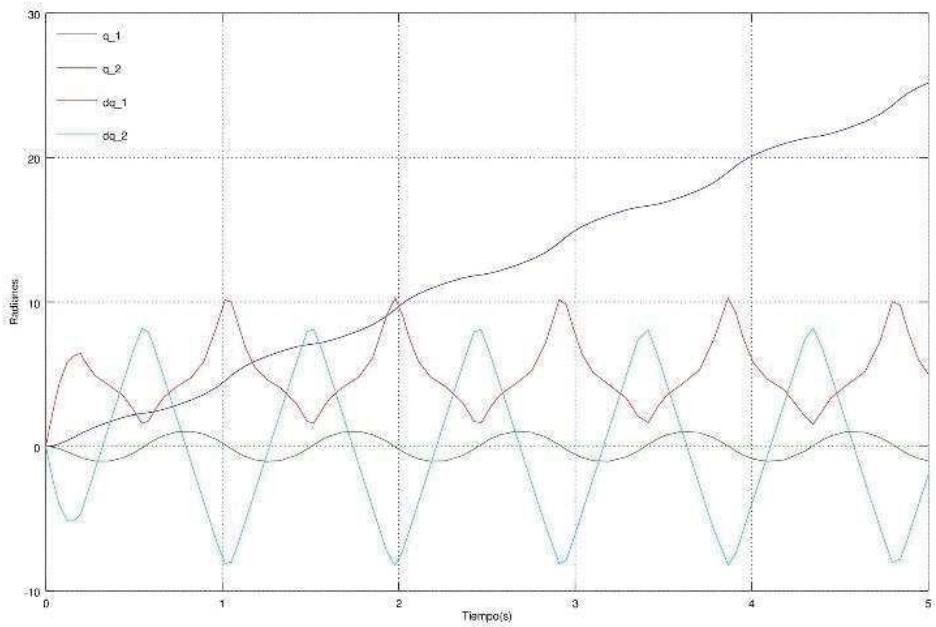


Figura 10. Simulación en GNU-Octave del sistema no lineal: péndulo invertido rotacional.

5. Conclusiones.

En este artículo se ha mostrado una alternativa para la enseñanza de la ingeniería cuando es necesario realizar simulaciones de los sistemas dinámicos no lineales para comprender el movimiento generado por la solución de sus ecuaciones diferenciales.

Sin embargo, para lograr un resultado eficiente, las simulaciones comúnmente se llevan a cabo en software especializado como Matlab™ que requiere de una licencia para su legal uso. La licencia por sí sola es un costo adicional para la institución educativa. Más aún, éste tipo de software necesita ser soportado en un equipo de cómputo con capacidades de hardware superiores a las computadoras de uso normal.

La alternativa mostrada consiste en usar GNU-Octave, el cual es un software libre que no requiere pagar el costo de una licencia para su legal funcionamiento.

Además, se ha mostrado que es posible utilizar una minicomputadora o tarjeta de desarrollo comercial, Raspberry Pi, como el dispositivo de cómputo sobre el cual está soportado el software GNU-Octave. Las comparaciones de las gráficas presentadas manifiestan, que la alternativa propuesta es viable para eficientar los recursos en la enseñanza de la ingeniería en mecatrónica.

Referencias

[1] Viñas, R. B. y Llinàs, F. A. Sistema operativo GNU/Linux básico. UOC. 2003.
[2] Houpis, C. H. y Sheldon, S. N. Linear Control System Analysis and Design with MATLAB®. CRC Press. 2013.
[3] Khatib, T. y Elmenreich, W. Modeling of Photovoltaic Systems Using MATLAB: Simplified Green Codes. John Wiley & Sons. 2016.
[4] Blaabjerg, F. y Ionel, D. M. Renewable Energy Devices and Systems with Simulations in MATLAB® and ANSYS®. CRC Press. 2017.
[5] López, C. MATLAB control systems engineering. Apress. 2014.
[6] Jain, S., Vaibhav, A. y Goyal, L. Raspberry Pi based interactive home automation system through E-mail. In Optimization, Reliabilty, and Information Technology (ICROIT), 2014 International Conference on (pp. 277-280). IEEE. 2014.
[7] Voglewede, P., Smith, A. H. y Monti, A. Dynamic performance of a scara robot manipulator with uncertainty using polynomial chaos theory. IEEE Transactions on Robotics, 25(1), 206-210. 2009.
[8] Lewis, F., Dawson, D. y Abdallah, C. Robot Manipulator Control, Theory and Practice. Segunda edición. New York, USA; Marcel Dekker Ink. 2006.
[9] Duart, J. L., Montero, B., Ospina, P. A., y González, E. Dynamic Modeling and Simulation of a Rotational Inverted Pendulum. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 792, No. 1, p. 012081). IOP Publishing. 2018.

Anexos

a. Código de S-Function para robot SCARA en Matlab™.

```
function [sys,x0,str,ts] = SCARA_FS_FESGRO(t,x,u,flag)

l1=0.50; l2=0.40; lc1=0.25;
lc2=0.20; m1=15; m2=12; m3=3;
m4=3; I1=0.02087*m1; I2=0.08*m2; I3=0.05*m3; I4=0.02*m4; g=9.81;

switch flag
  case 0
[sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes(l1,l2,lc1,lc2,m1,m2,m3,m4,I1,I2,I3,I4,g);
  case 1
```

```
sys=mdlDerivatives(t,x,u,l1,l2,lc1,lc2,m1,m2,m3,m4,I1,I2,I3,I4,g);
 case 3 sys=mdlOutputs(t,x,u,l1,l2,lc1,lc2,m1,m2,m3,m4,I1,I2,I3,I4,g);
 case {2 4 9}
    sys = [];
 otherwise
 error(['Unhandled flag=',num2str(flag)]);
end
function [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes(l1,l2,lc1,lc2,m1,m2,m3,m4,I1,I2,I3,I4,g)
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates  = 8;   sizes.NumDiscStates  = 0;   sizes.NumOutputs     = 8;
sizes.NumInputs      = 0;
sizes.DirFeedthrough = 0;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0  = [0,0,0,0,0,0,0,0]'; str = [];
ts  = [0 0];
function sys=mdlDerivatives(t,x,u,l1,l2,lc1,lc2,m1,m2,m3,m4,I1,I2,I3,I4,g)
T11=2; T21=3; T31=0; T41=30;
Tao = [T11;T21;T31;T41];
m11 =
I1+I2+I3+I4+m1*lc1^2+m2*(l1^2+lc2^2+2*l1*lc2*cos(x(6)))+(m3+m4)*(l1^2+l2^2+2*l1*l2*c
os(x(6)));
m12 = I2+I3+I4+m2*(lc2^2+l1*lc2*cos(x(6)))+(m3+m4)*(l2^2+l1*l2*cos(x(6)));
m13 = I3+I4;
m14 = 0;
m22 = I2+I3+I4+m2*lc2^2+(m3+m4)*l2^2;
m44 = m4;
M   = [m11,m12,m13,m14;m12,m22,m13,m14;m13,m13,m13,m14;m14,m14,m14,m44];
c11 = -m2*l1*lc2*sin(x(6))*x(2)-(m3+m4)*l1*l2*sin(x(6))*x(2);
c12 = -m2*l1*lc2*sin(x(6))*(x(1)+x(2))-(m3+m4)*l1*l2*sin(x(6))*(x(1)+x(2));
c21 = m2*l1*lc2*sin(x(6))*(x(1))+(m3+m4)*l1*l2*sin(x(6))*x(1);
xdot=[x(1);x(2);x(3);x(4)];
C   = [c11,c12,0,0;c21,0,0,0;0,0,0,0;0,0,0,0]*xdot;
G   = [0;0;0;m4*g];
B = [0.5*x(1);0.5*x(2);0.5*x(3);0.5*x(4)];
sys(1:4) = inv(M)*(Tao-C-G-B);
sys(5:8) = eye(4)*x(1:4);
function sys=mdlOutputs(t,x,u,l1,l2,lc1,lc2,m1,m2,m3,m4,I1,I2,I3,I4,g)
sys = x;
```

b. Código para simulación de robot SCARA en GNU-Octave.

El código para la función que establece las ecuaciones diferenciales del modelo dinámico del robot SCARA es el siguiente.

```
function xpp = projectile(t,x)
xpp=zeros(8,1);
m1=15; m2=12; m3=3; m4=3;
l1=0.50; l2=0.40; lc1=0.25; lc2=0.20;
I1=0.02087*m1; I2=0.08*m2; I3=0.05*m3;
I4=0.02*m4; g = 9.81;
T1=2; T2=3; T3=0; F4=30;
Ipsilon = [T1;T2;T3;F4];
B1=B2=B3=B4=0.5;
B=[B1;B2;B3;B4];
m11=
m1*lc1^2+I1+m2*(l1^2+lc2^2+2*l1*lc2*cos(x(2)))+I2+(m3+m4)*(l1^2+l2^2+2*l1*l2*cos(x(2
)))+I3+I4;
m12= m2*(lc2^2+l1*lc2*cos(x(2)))+I2+(m3+m4)*(l2^2+l1*l2*cos(x(2)))+(I3+I4);
m21= m2*(lc2^2+l1*lc2*cos(x(2)))+I2+(m3+m4)*(l2^2+l1*l2*cos(x(2)))+(I3+I4);
m13=m23=m31=m32=I3+I4;
m14=m24=m34=m41=m42=m43=0;
m22=m2*lc2^2+I2+(m3+m4)*l2^2+I3+I4;m44=m4;
```

```
M=[m11 m12 m13 m14; m21 m22 m23 m24; m31 m32 m33 m34; m41 m42 m43 m44];
c11=-m2*l1*lc2*sin(x(2))*x(6)-1*(m3+m4)*l1*l2*sin(x(2))*x(6);
c12=-m2*l1*lc2*sin(x(2))*(x(5)+x(6))-(m3+m4)*l1*l2*sin(x(2))*(x(5)+x(6));
c21= m2*l1*lc2*sin(x(2))*x(5)+(m3+m4)*l1*l2*sin(x(2))*x(5);
c13=c14=c22=c23=c24=c31=c32=c33=c34=c41=c42=c43=c44=0;
C=[c11 c12 c13 c14; c21 c22 c23 c24; c31 c32 c33 c3; 4c41 c42 c43
c44]*[x(5);x(6);x(7);x(8)];
g1=g2=g3=0; g4=m4*g;
G = [g1; g2; g3; g4];
B=[.5*x(5);.5*x(6);.5*x(7);.5*x(8)];
A = (inv(M))*(Ipsilon-C-G-B);
P = eye(4)*[x(5);x(6);x(7);x(8)];
blockderiv(5:8) = A;
blockderiv(1:4) = P;
xpp = blockderiv';
```

El código para establecer las características del solucionador, mandar a llamar la función de las ecuaciones difernciales y graficar los resultados obtenidos, es dado por:

```
clc
close all
clear all
global y0
te=0; y0=zeros(8,1); tspan = [0 10];
vopt = odeset ("RelTol", 1e-4,"AbsTol", 1e-4,"NormControl", "on");
[t,y] = ode45(@projectile1,tspan,y0,vopt);

plot(t,y);
ylabel("Radianes");
xlabel("Tiempo (s)");
legend("q_1","q_2","q_3","q_4", "dq_1","dq_2","dq_3","dq_4","location","northwest");
legend("boxoff");
```

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 27, pp.341 - 349, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Diseño, Simulación e Implementación de un Buck Converter Voltage Regulator con un Controlador PI y un Circuito PWM Basado en Arduino

Silva Cruz Eric Mario, Hernández Lucas Luis Octavio, Hernández Castillo Jair Abdiel, Pérez Hernández José Eduardo, Reyes Urenda Josué Vladimir y García García Rafael Adrián

Escuela de Ingenierías y Arquitectura Universidad La Salle Oaxaca
ericmsc@hotmail.com

Resumen

El presente documento detalla el diseño, simulación y la implementación de convertidor DC/DC Buck. Los circuitos convertidores de voltaje son ampliamente utilizados en la conversión de voltaje como circuitos reguladores, la gran variedad de aplicaciones los hace muy versátiles, el interés de este artículo es definir el comportamiento de los componentes del convertidor Buck y medir las limitaciones de la plataforma Arduino, la cual se utiliza como generador de PWM para controlar el disparo del MOSFET. Así también, se aplica un controlador PI para lograr una mejor regulación de voltaje.

Palabras Clave: Arduino, Buck Converter, Control PI, PWM.

1. Introducción

Hoy en día los circuitos reguladores de voltaje y corriente tienen una gran aplicación en los sistemas de energía renovables, tal es el caso de la energía fotovoltaica, y eólica, en donde los procesos de rectificación, conversión, regulación e inversión de voltaje demandan este tipo de circuitos.

Los dispositivos de potencia que se aplican en la regulación de voltaje son característicos por soportar altos voltajes y corrientes, así como su frecuencia de funcionamiento. Estos dispositivos se caracterizan por utilizar una compuerta de control mediante un circuito de disparo, tal es el caso del MOSFET, [1, 2].

El Buck converter, también conocido como reductor, es un convertidor de potencia DC/DC sin aislamiento galvánico, que obtiene a su salida una tensión menor que a su entrada. Consiste en una fuente conmutada con dos dispositivos semiconductores (Mosfet y Diodo), un inductor, un condensador y una resistencia de carga. Este se encarga de disminuir y controlar un voltaje en DC mediante una activación por PWM (Modulación por ancho de pulso). Es útil cuando el aislamiento eléctrico no es necesario entre el circuito de conmutación y la salida. Se aplica regularmente para estabilizar las tensiones de corriente continua con ruido o poco estables proporcionadas por una batería o fuente de alimentación CD, tal es el caso de los sistemas fotovoltaicos. Su uso se extiende a la construcción de inversores y no-breaks, [3 - 6].

El Mosfet de conmutación entre la entrada y la salida del convertidor se enciende y apaga continuamente a alta frecuencia y es controlado por un circuito de disparo con un ancho de pulso modulado (PWM). Para mantener una salida continua, el circuito utiliza la energía almacenada en el inductor L, durante los periodos de encendido del mosfet de conmutación, para así continuar suministrando la carga durante los periodos de apagado y emitiendo energía a una velocidad constante.

La implementación del circuito que regula la activación del Buck Converter requiere de dispositivos con velocidades de disparo de alta frecuencia para lograr una estabilidad mayor en la salida. La tarjeta Arduino es una plataforma de hardware libre que nos permite crear controles de conmutación eléctrica, esto mediante sus salidas PWM, además de ser una tarjeta flexible, versátil y de fácil programación, [7]. El objetivo principal de este trabajo es considerar las características de diseño de los componentes y evaluar la tarjeta Arduino nano como dispositivo generador de PWM.

En la siguiente sección del artículo se detalla las características de diseño, simulación e implementación del Buck Converter. En la sección III, se detallan las conclusiones obtenidas al implementar este sistema. Así mismo, en la sección IV se muestran las conclusiones obtenidas al finalizar la implementación.

2. Diseño y simulación del Buck Converter con PSIM

El buck converter consta de una fuente de alimentación en DC, junto con un generador de pulsos, un mosfet, un diodo, una bobina, un capacitor, así como una resistencia de carga, el diseño se basa en [2-6, 8]. Para evaluar el desempeño del circuito se decidió usar el software de simulación PSIM en su versión demo, la cual nos ofrece los recursos básicos para determinar el comportamiento del Buck Converter, y obtener la respuesta aproximada en la implementación.

El circuito en la simulación de PSIM consta de un tiempo de simulación limitado debido al tipo de versión del software. En la Figura 1, se muestra el circuito implementado en el simulador PSIM.

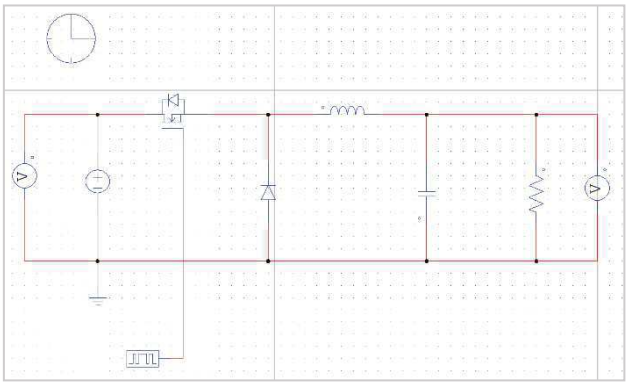


Figura 1. Diagrama del circuito con MOSFET y PWM.

Los valores de los componentes utilizados en el circuito se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Lista de componentes en el Buck Converter.

Componentes	Valores	
	Valor utilizado	***Valor ideal***
Mosfet	IRFZ44N	IRFZ44N
Diodo	1N4004	1N4004
Inductor	264µH	264µH
Capacitor Electrolítico	2287µF	2287µF
Resistencia	985Ω	1KΩ

Una vez realizada la simulación se pueden observar los valores obtenidos mediante el empleo del Buck Converter y un disparo controlado mediante el bloque de control del simulador PSIM, Figura 2, con una frecuencia de 60 Hz y un disparo a un Ángulo de 30 grados.

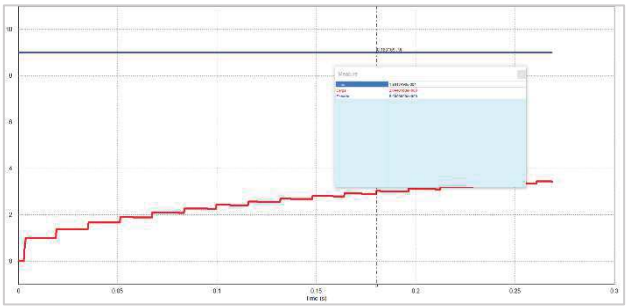


Figura 2. Simulación con PSIM.

Con un valor de voltaje de entrada de 9 volts y una regulación de voltaje de salida de 2.9 volts, como se observa en la Figura 3.

Measure

Time	1.8017493e-001
Carga	2.9440163e+000
Entrada	9.0000000e+000

Figura 3. Voltaje de Entrada y en la Carga del Buck Converter.

El tiempo de simulación es limitado en el PSIM, sin embargo, se aprecia claramente como el voltaje de carga (salida) aumenta de manera casi proporcional con respecto al tiempo hasta llegar a un valor estable. Para lograr una mayor estabilidad se utiliza un controlador PI, con valores, ganancia del control proporcional de 100 y de integrador 0.001, como se observa en la Figura 4.

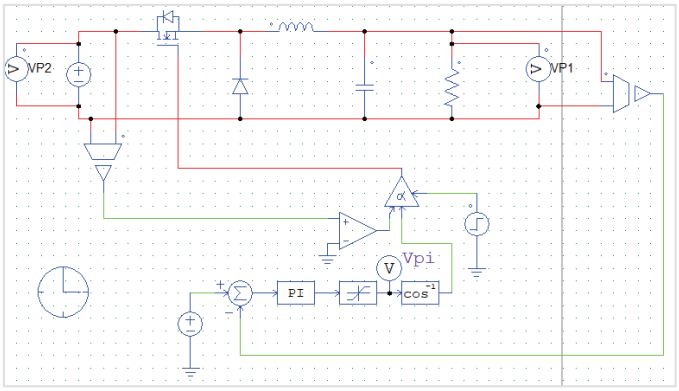


Figura 4. Buck Converter con Control PI.

El valor obtenido de aplicar un controlador PI se aproxima con mayor precisión al valor deseado de regulación, en la simulación el resultado se observa en la Figura 5.

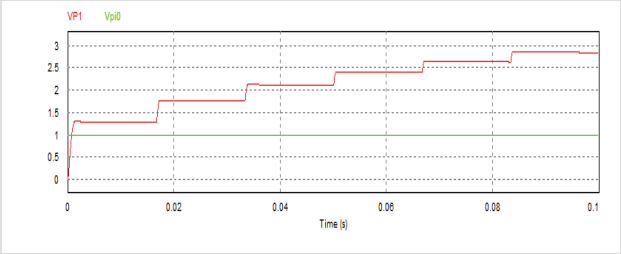


Figura 5. Voltaje Obtenido en PSIM del Buck Converter con Control PI.

3. Implementación del Buck Converter con PWM de Arduino

El diseño implementado requiere de circuitos que sean lo más precisos posibles con respecto a los valores de simulación. La complejidad de obtener valores exactos de inductancias origino la necesidad de usar el valor de inductancias, comerciales para aproximarse al valor deseado, tal como se observa en la Figura 6.

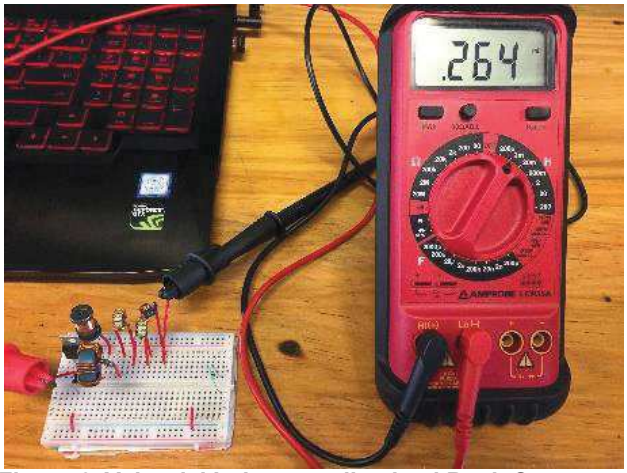


Figura 6. Valor del Inductor aplicado al Buck Converter.

Los valores del resistor y capacitor utilizados en la implementación del Sistema se visualizan en las Figuras 7 y 8.

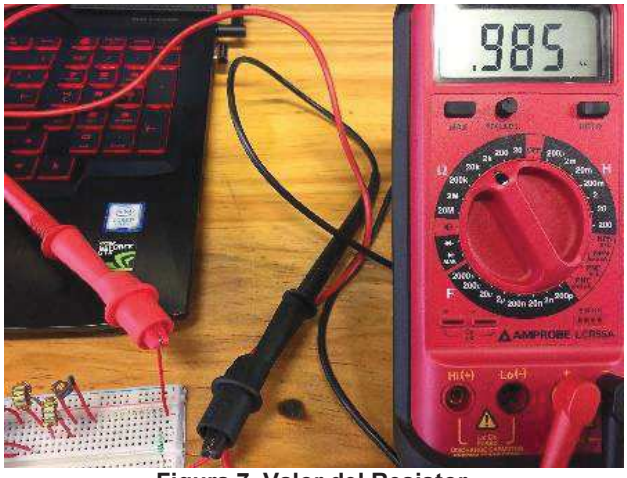


Figura 7. Valor del Resistor.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 27, pp.341 - 349, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

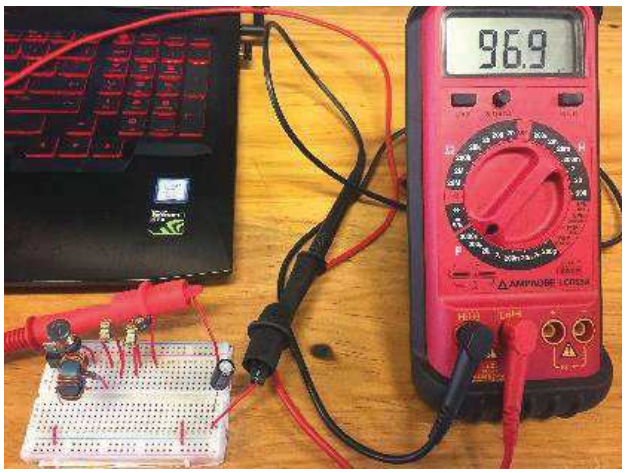


Figura 8. Valor del Capacitor.

Las características del MOSFET, se especifican en la Tabla 2. Se observa el dispositivo MOSFET de canal N en la Figura 9.

Tabla 1. Mosfet IRFZ44N **Canal N.**

Símbolo	Tabla II. Mosfet IRFZ44N Canal N	
	Parámetro	***Valor Máximo***
VDS	Voltaje en Fuente y Drenaje	55 V
ID	Corriente de Drenaje	49 A
Ptot	Potencia total discipada	110 W
Tj	Temperatura de junction	175 ºC
RDS(ON)	Resistencia	22 mΩ

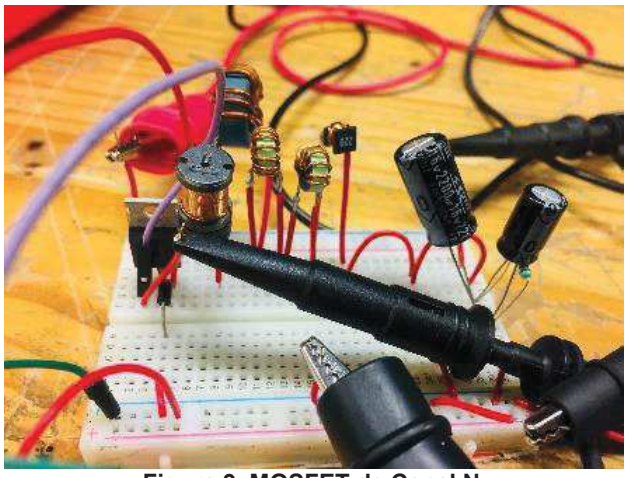


Figura 9. MOSFET de Canal N.

El mosfet IRFZ44N es de tipo N, posee una unidad de potencia de efecto de campo de nivel estándar. Puede disipar una potencia total de 100Watts, y tiene diodos Zener integrados que dan temperatura de unión de 175 grados centígrados.

4. Implementación del PWM con Arduino

Para la implementación el circuito de disparo se establecieron las características de funcionamiento del Arduino Nano, las consideraciones de simulación son una simulación en una frecuencia de 60 Hz, la cual es la base de transformación de valores de potencia, en AC / DC, para lo cual se tiene un periodo definido a continuación.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} = 16.6\, mseg \tag{1}$$

Para lograr el disparo del MOSFET se requiere un tiempo de activación de la señal de disparo, la cual se genera mediante los tiempos 1 y 2, que se especifican a continuación en la Figura 10, en los cuales toman como base el valor de conversión máximo permisible por la tarjeta arduino y el tiempo en milisegundos que define la frecuencia de disparo.

$$Tiempo\ 1 = [(Valor\ analógico)\ *(16/1023)] \tag{2}$$

$$\text{Tiempo } 2 = (16 - \text{Tiempo } 1) \tag{3}$$

Estos valores se implementan en el programa de Arduino que permite la obtención de los tiempos de disparo para la compuerta del semiconductor activado por compuerta, tal y como se observa en la Figura 10 y 11.

```
valorpot=analogRead(A0);
Serial.println(valorpot);

int tiempo1=valorpot*0.0156402737;
int tiempo2=16-tiempo1;
```

Figura 10. Tiempos de activación del disparo.

```
//Activamos el pin en alto, esto será un 1 lógico
digitalWrite(pin,HIGH);
//La duración del encendido de pin será en milisegundos.
delay(tiempo1);
//Desactivamos el pin en bajo, esto será un 0 lógico
digitalWrite(pin,LOW);
//La duración del apagado de pin será en milisegundos.
delay(tiempo2);
```

Figura 11. Programa que habilita el disparo PWM en Arduino.

Las modificaciones que permite esta variación del disparo del PWM en el Arduino permite lograr tantos valores de ciclo de trabajo.

La variación del ciclo de trabajo en el disparo de la compuerta nos permite evaluar los límites máximos y mínimos en el control del valor del voltaje obtenido en el circuito del Buck Converter, lo cual se observa en la Tabla 3.

Se observa en los valores obtenidos de la implementación con distintos ciclos de trabajo que se obtiene una mayor precisión en el valor del voltaje requerido en la carga del Buck Converter.

Tabla 2. Ciclo de Trabajo.

Ciclo de trabajo (Dutty Cycle)	*Voltaje en la carga*	*t en milisegundos*
6.29%	2.56mV a 2.64mV	15
12.1% a 12.3%	2.72 V	14
18.1% a 18.4%	2.80 V	13
30.2% a 30.4%	2.88 V	11
42.4% a 42.6%	2.88 V	09
48.4% a 48.7%	2.88 V a 2.96 V	08
54.5% 54.7%	2.96 V	07
60.4% a 60.6%	2.96 V	06
72.5%	2.96 V	04
78.5% a 78.7%	2.96 V	03
84.5% a 84.8%	2.96 V	02
90.6% a 90.8%	2.96 V	01

La regulación del ciclo de trabajo se logra mediante la implementación de un potenciómetro variable, el cual permite lograr la variación de la salida PWM de la tarjeta Arduino, tal como se observa en la Figura 12.

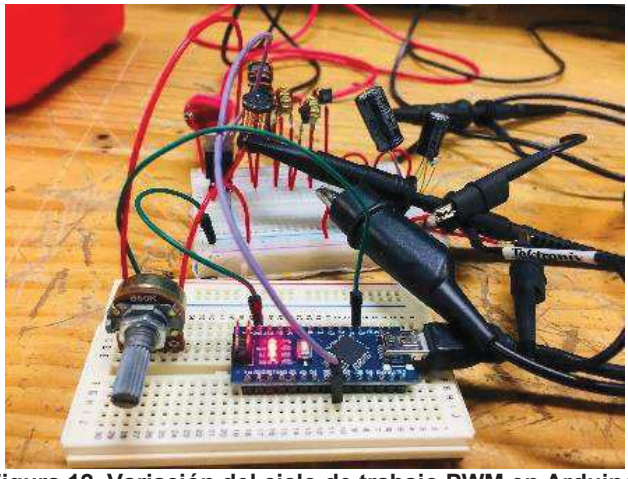


Figura 12. Variación del ciclo de trabajo PWM en Arduino.

Los valores de voltaje obtenidos en la carga del circuito Buck Converter con la variación del ciclo de trabajo nos determina una mayor aproximación al valor deseado.

Con un ciclo de trabajo de 6.29% se obtiene un valor de voltaje de salida de 2.64V, lo cual se aprecia en la Figura 13, llegando a ser la respuesta obtenida con el osciloscopio.

En la Figura 14 con un valor de ciclo de trabajo al 48.4% se logra un valor de voltaje a la salida de 2.96V, el cual es un valor más preciso con respecto al valor deseado en la carga.

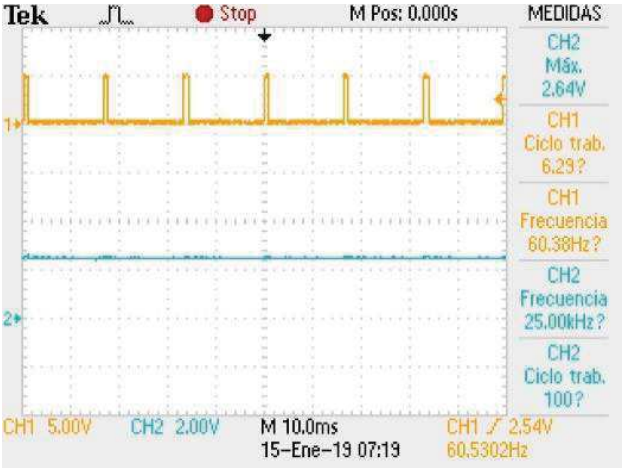


Figura 13. Voltaje obtenido con un ciclo de trabajo de 6.29%.

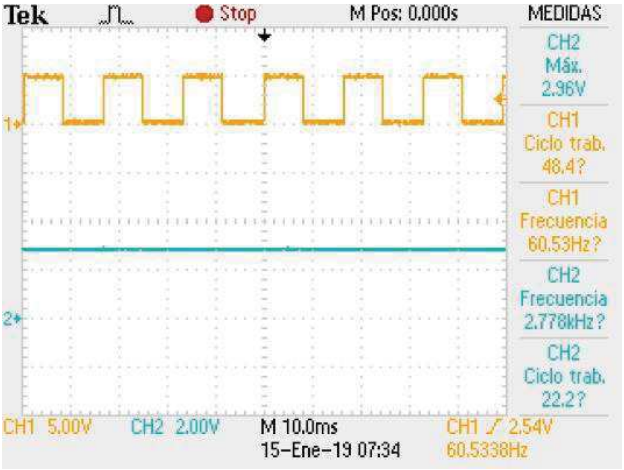


Figura 14. Voltaje obtenido con un ciclo de trabajo de 48.4%.

5. Conclusiones

Con la implementación de un circuito Buck Converter podemos regular el voltaje de entrada a un valor deseado y mantenerlo en dicho valor conforme incremente el tiempo. Esto economiza los costos en función de la resistencia que poseen los reguladores lineales además de tener un mayor porcentaje de eficiencia ya que es posible aplicar un circuito de control de disparo y que regulen el valor deseado.

Mediante el empleo del Sistema Arduino es posible lograr un valor de ciclo de trabajo en el cual se pueda variar la precisión del valor de voltaje obtenido siempre y cuando se considere un disparo controlado a una determinada frecuencia de disparo.

Se observa en la implementación que los requerimientos para obtener un valor correcto esta en función de aplicar los valores exactos en los componentes, sin embargo, se puede compensar mediante la variación del disparo y de un controlador proporcional integral.

Referencias

[1] Muhammad H. Rashid, "*Electrónica de Potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones*", Editorial Prentice Hall, 2004.

[2] Maloney, Timothy J., "*Electrónica industrial del estado sólido*", 5ª Edición, Editorial Pearson, 2006, México.

[3] Mohan Ned, *"Electrónica de potencia convertidores aplicaciones y diseño"*, 3ª Edición, Editorial Mc Graw Hill, 2009, México.

[4] Hart, Daniel W., *"Electrónica de potencia"*, 1ª Edición, Editorial Pearson, 2004, México.

[5] Syed_Nasar, *"Schaum´s Outline of Electrical Power"*, Editorial Mc Graw Hill, Schaum´s series, 1990.

[6] Steven T. Karris, Circuit Analysis II with MATLAB® Computing and Simulink® SimPowerSystems® Modeling, Orchard Publications, 2009.

[7] Margolis M. *"Arduino Cookbook"*, O´s Reilly Publishing, 2011.

[8] N H Baharudin et al, *"Performance Analysis of DC-DC Buck Converter for Renewable Energy Application"*, J. Phys.: Conf. Ser. 1019 012020, 2018.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 28, pp.350 - 362, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Diseño y Construcción de una Prótesis de Mano Controlada por Medio de un Sensor Mioeléctrico

Valadez Palacios Andrés[1], Luviano Cruz David [1*], García Luna Francesco José [1] y García Villalba Luz Angelica [1].

1-Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
*david.luviano@aucj.mx

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo el diseño y la construcción de una prótesis impresa de mano, la cual reciba las señales de control en lazo abierto a partir de un sensor de señales mioeléctrica. El diseño mecánico fue validado por medio de simulación y experimentos con la mano impresa. El prototipo final cumple con los objetivos de funcionalidad y costo bajo.

Palabras clave: prótesis mano, impresión 3D, Sistema mioeléctrico.

1. Introducción

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), incluyó el tema de la discapacidad, a partir de la metodología propuesta por el Grupo de Washington sobre estadísticas de la discapacidad (WG por sus siglas en ingles), para identificar a la población con discapacidad; a partir de ésta es posible conformar tres grupos: la población con discapacidad, la población con limitación y la población que no tiene discapacidad ni limitación.
En este contexto, el INEGI presenta la publicación de las personas con discapacidad, datos al 2014. [1]

La prótesis es una ayuda técnica para personas carentes del miembro del cuerpo, la cual combina la mecánica y electrónica. En el caso de prótesis de mano, la parte mecánica está compuesta por: un mecanismo de cuatro barras que se implementa en los dedos con el fin de tener un cierre de la mano que se adapte a la geometría del objeto y pueda realizar distintos tipos de agarre, los actuadores, son seleccionados de acuerdo con las necesidades del paciente y a la antropometría del miembro superior los cuales le proporcionan la movilidad y un espacio de trabajo más amplio al paciente. [2]

Una prótesis es un artefacto desarrollado con el fin de mejorar la calidad de vida de las personas que por algún accidente perdieron alguna extremidad de su cuerpo. Por medio del avance de la tecnología en las últimas décadas las prótesis cada vez son más avanzadas.

El cuerpo humano es capaz de generar señales eléctricas en sus músculos, a estas señales se les conoce como señales bioeléctricas. Las señales bioeléctricas se dividen en diferentes tipos dependiendo de la procedencia de dicha señal.

Las señales mioeléctricas son las generadas por la contracción de algún musculo de cualquier extremidad como lo son los brazos y las piernas, pueden medirse con un equipo adecuado y así utilizar la información que estas nos proporcionan en el diseño de prótesis. [3]

La señal muscular o mioeléctrica (SME) utilizada para la activación de las prótesis tiene las siguientes características amplitud de entre 50 μV y 5 mV, y un rango de frecuencia de 20 Hz a 500 Hz. Por lo que para la elaboración del prototipo de prótesis primero se registra la SME mediante electrodos de

plata-cloruro de plata (Ag-AgCl) por su disponibilidad, por no ser invasivo y por su fácil uso; estos se colocan sobre la superficie de la piel en el músculo de interés.

Se recomienda que los electrodos tengan un diámetro de 10mm, sean de forma circular y para su colocación se considere una separación de 2 cm a 3 cm. Una vez registrada la SME, se acondiciona para posteriormente ser procesada. El acondicionamiento consiste en etapa de filtrado para delimitar el ancho de banda de la señal y atenuar el ruido de 60 Hz presente en el entorno, así como el que se debe a el movimiento de cables de los electrodos e interferencias (como señales procedentes de otros músculos y la señal ECG). También consta de etapas para amplificar la SME dado que tiene una amplitud pequeña ya que se encuentra en el rango de los microvolts a milivolts. Y finalmente una etapa de rectificación para el procesamiento digital de la SME.

El objetivo del procesamiento es identificar cuándo se presenta actividad muscular (contracción muscular) y cuando no (relajación muscular) para activar el prototipo. [4]

En la actualidad, existe una amplia gama de este tipo de dispositivos prostéticos, que incluyen desde prótesis de alta tecnología, tales como las manos Be-Bionic y i-Limb, hasta aquellas con pocos grados de libertad, figura 1 y 2.

Figura 1. Mano Be-Bionic. [5]

Un aspecto importante en el desarrollo de dispositivos prostéticos es el método seleccionado para activar algún movimiento. Existen sistemas que incluyen arreglos preestablecidos de electrodos superficiales para la adquisición de EMG, permitiendo al dispositivo prostético realizar una amplia gama de movimientos al emplear un clasificador discriminante lineal (LDC, por sus siglas en inglés).

Figura 2. Mano i-Limb. [5]

Además, a pesar del alto costo computacional requerido, se ha optado en algunos casos por utilizar la transformada wavelet para controlar prótesis junto con un LDC debido a su eficiencia para lograr una discriminación adecuada de hasta veinte movimientos diferentes. De igual forma, se han implementado sistemas que consideren la variación en la intensidad de las contracciones musculares en los registros de EMG, generando aumentos en la eficiencia de clasificación. Algunos sistemas prostéticos utilizan la implantación de sensores mioeléctricos para controlar prótesis de miembro superior de hasta tres grados de libertad que permite un funcionamiento adecuado del dispositivo. [5]

2. Método.

El propósito es realizar una investigación acerca de las prótesis de mano, para la creación de un prototipo al cual tendrá como finalidad sostener un objeto.

Se toma en cuenta la mano promedio de un mexicano el cual está entre tamaño de 10 y 11 cm de ancho, 20 y 21 cm de largo, estas medidas se obtuvieron de la página oficial del INEGI.

En la figura 3 se muestran la metodología a seguir para la creación del prototipo, tal y como aparece, se lleva una secuencia para llegar a hasta las pruebas finales, se toma en cuenta que cada paso es esencial para el avance del proyecto.

Figura 3. Metodología del prototipo.

Palma.

La palma cuenta con orificios en la parte frontal por donde se canalizarán los cables, los cuales se van a conducir hasta los servomotores, cabe mencionar que la palma por dentro esta hueca solo tiene el grosor necesario por donde va a pasar el cable, en la figura 4 se muestra el diseño de la prótesis de mano en sólido.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 28, pp.350 - 362, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

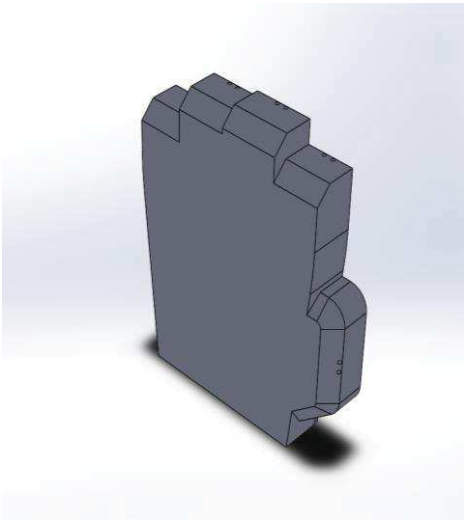


Figura 4. Palma

Falanges.

Se muestra el diseño de las falanges en la figura 5, el cual cuenta con un orificio por el cual va a pasar el cable que va hacía los servomotores, cuenta con las dimensiones similares al de un mexicano. Las dimensiones se muestran en la tabla 1.

Las falanges cuentan con un corte a 45 grados, esto va a ayudar a que cuando se trabaje con las otras dos falanges del mismo dedo pueda realizar el movimiento correcto al momento de contraerse. También cuenta con unos orificios en los cuales va a pasar el hilo de nylon que servirá como articulación entre las falanges, Se pretende que cuando el dedo se cierre se flexione tal como los dedos humanos.

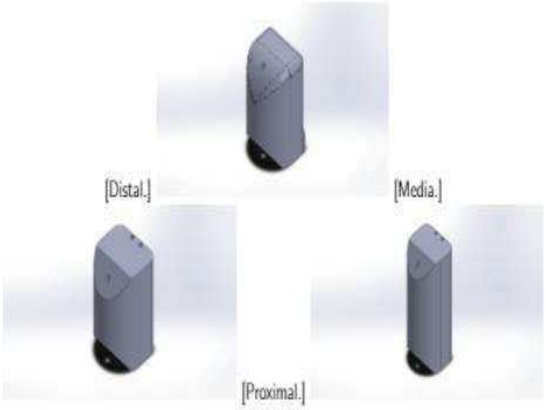


Figura 5. Falange proximal, media y distal.

Falange	Medida
Proximal	45 mm
Media	28 mm
Distal	26 mm

Tabla 1. Medidas del dedo anular.

Dedos.
Los dedos están conformados por tres eslabones los cuales están impresos individualmente, estos van a estar vinculados con un hilo de nylon. Este hilo va a correr a través de las falanges y va a llegar a los servomotores, los cuales al momento de ser accionados va a contraer el hilo y así lograr el funcionamiento de los dedos.

En las figuras 6 y 7 se muestran los orificios por donde va a estar pasando el hilo de nylon.

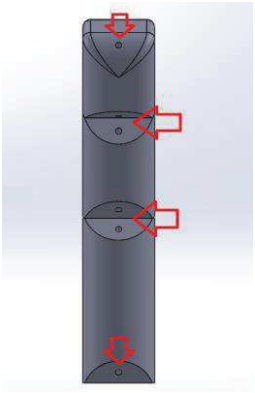


Figura 6. Orificios por donde pasa el hilo de nylon.

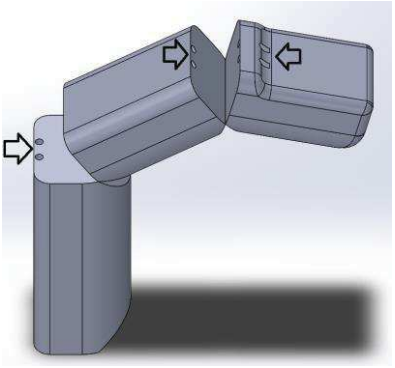


Figura 7. Orificios por donde pasa el hilo de nylon que sirve para contraer los dedos.

Pulgar.
En el dedo pulgar sigue con el mismo diseño que las demás falanges y este al igual que al de una mano humana consta de dos falanges, el proximal y distal, ver figura 8.

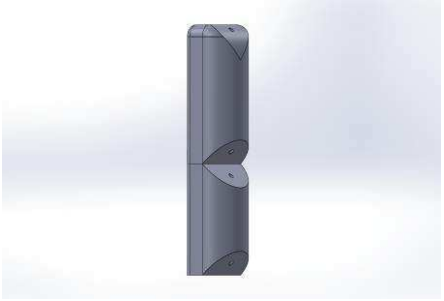


Figura 8. Dedo pulgar.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 28, pp.350 - 362, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Antebrazo.
El antebrazo, consta de una sola pieza la cual sirve para sostener los servomotores utilizados e integrar los componentes electrónicos a utilizar, estos estarán en la parte interior del antebrazo y así solo tener por fuera el sensor mioeléctrico, para darle una mejor estética al prototipo, ver figura 9.

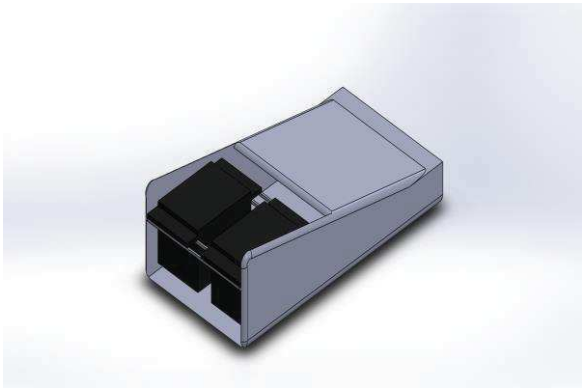


Figura 9. Antebrazo.

Ensamble final.
Después de realizar la validación del diseño procedimos a realizar la impresión para seguir con el ensamble de cada una de las falanges y posteriormente con las conexiones electrónicas, en la figura 10 se muestra cómo queda el diseño final con su ensamble de todas piezas.

El ensamblaje consta de 16 piezas impresas, cada una por separado. Para el proceso de impresión se utilizó la impresora MakerBot Replicator+ [8] y el material para realizar la impresión fue el PLA. Los componentes se listan en la tabla 2.

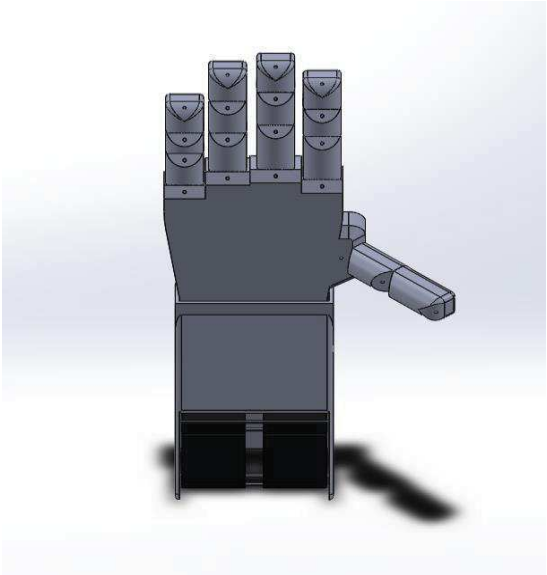


Figura 10. Ensamble final.

Numero de parte	Nombre de parte	Cantidad
1	Palma	1
2	Falange proximal	5
3	Falange media	4
4	Falange distal	5
5	Antebrazo	1
6	Servomotor	2
	Total.	18

Tabla 2. Componentes del ensamble.

Esquema electrónico.
Para realizar el diseño electrónico se utiliza el software fritzing [7], el cual es compatible con Arduino, se especializa en diseños electrónicos y se puede realizar el código a la vez, ya teniendo todo conectado y terminado, se puede hacer la simulación.
También se anexa el esquema electrónico el cual se muestra en la figura 11.

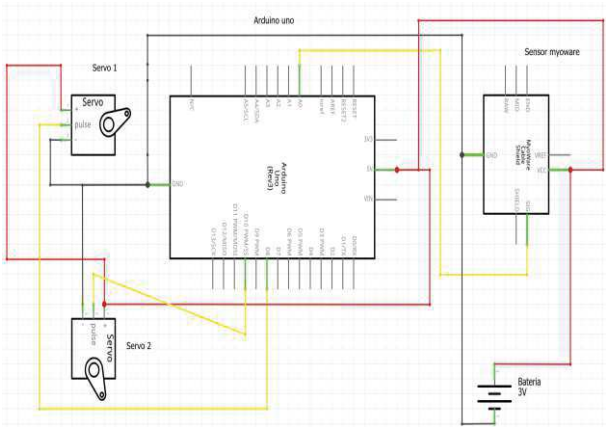


Figura 11. Circuito electrónico.

Control electrónico.
Al momento que el usuario realice un movimiento o flexión se genera una señal análoga la cual proviene del sensor esta señal pasa al controlador al momento de generar un pulso la cual genera el control para los servomotores y así tensar el hilo y de esta manea obtener un movimiento.

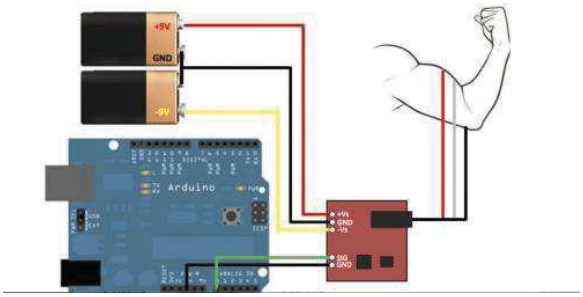


Figura 12. Esquema del control. [6]

El sensor muscular MyoWare es un sensor de electromiografía (EMG) de Advancer Technologies, sus especificaciones se muestran en la tabla 3. La placa MyoWare actúa mediante la medición de la actividad eléctrica filtrada y rectificada de un músculo; la salida de 0-V Volts dependiendo de la cantidad de actividad en el músculo seleccionado, donde Vs representa el voltaje de la fuente de alimentación, ver figura 12.

Para colocarlo a la piel es necesario tres electrodos de almohadillas que se conectan al sensor por medio de broches lo que hace fácil de poner y quitar. Dos de los electrodos son colocados directamente a la placa del sensor mientras que el tercero se coloca al final de una extensión de cable que trae. [6]

Especificaciones	Unidades
Sensores	3
Voltaje	2.9 v a 5.7 v
Indicadores LED	2
Dimensiones	0.82'' x 2.06''

Tabla 3. Especificaciones del sensor MyoWare.

Ensamble en físico.
Ya teniendo los componentes electrónicos a utilizar y todos los objetos del prototipo impreso, se comienza a ensamblar cada uno de ellos para hacer las pruebas y realizar el funcionamiento. En la siguiente figura 13 se muestra el ensamble final en físico.

Figura 13. Prototipo

Servomotores.
Los servomotores usados fueron dos del modelo MG996R [9], provee buena precisión en movimientos angulares, también proporciona un muy buen torque, ya que no se tiene ninguna dificultad al momento de que estos tensen el hilo de nylon para el accionamiento del prototipo.
Las especificaciones del servomotor se muestran en la tabla 4.

Especificaciones	Medidas
Dimensiones	40.7 x 19.7 x 42.9 mm
Peso	60 gramos
Voltaje	4.8 v a 7.2 v
Amperaje	500 mA a 900 mA

Tabla 4. Especificaciones del servomotor.

3. Resultados

Ya teniendo el prototipo impreso y ensamblado con todos los componentes tiene la capacidad de poder ser controlado por medio de señales mioeléctricas las cuales son detectadas con el sensor MyoWare.

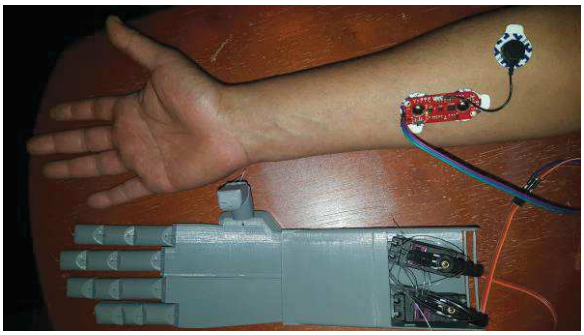


Figura 14. Usuario con mano abierta.

Al momento de realizar las pruebas se destaca que el sensor se debe colocar en una parte sensible del brazo para que pueda leer las señales con fidelidad, en la figura 14 se muestra como quedan los dedos cuando no se obtiene una buena lectura.

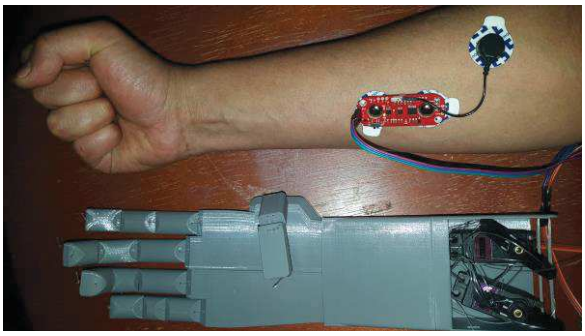


Figura 15. Usuario realizando primera prueba con mano cerrada.

Se puede observar que en los falanges media y distal se intentan contraer, pero no lo hacen de manera completa, figura 15.

Al cambiar el sensor MyoWare de posición el en antebrazo se logra ver que el prototipo tiene una mejor respuesta al momento de la lectura de señal, en la figura 16 se aprecia que el prototipo ya es capaz de cerrar los dedos.

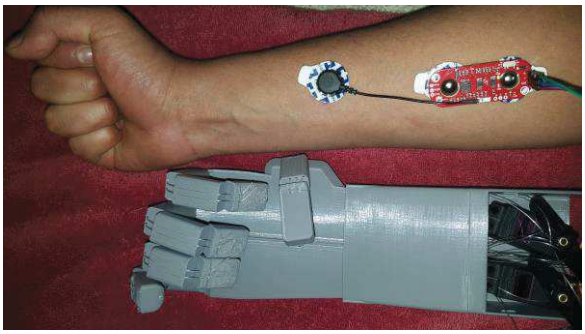


Figura 16. Usuario con mano cerrada.

El dispositivo cuenta con 3 sensores los cuales se les tiene que colocar un electrodo en cada sensor para poderlo adherirlo a la piel del brazo.
En la siguiente figura 17 se muestran que tipo de electrodos son lo que utiliza el sensor

Figura 17. Electrodos [6]

Al momento de probar el sensor MyoWare puesto en el antebrazo, se realizan las pruebas al abrir y cerrar la mano para observar la lectura que da. En las figuras 18 y 19 se puede apreciar cómo se comporta al momento que se cierra y abre la mano, se puede observar que hay dos tipos de gráficas, una de color azul y otra roja, esto se debe a los dos sensores que se tiene fijos en la PCB (placa de circuito impreso). Dependiendo en que parte del antebrazo se coloque el sensor para que arroje la señal más precisa.

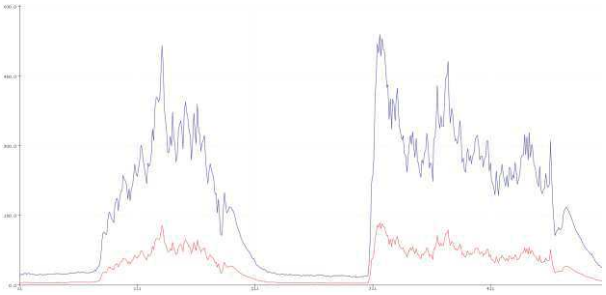


Figura 18. Señales obtenidas al abrir y cerrar la mano

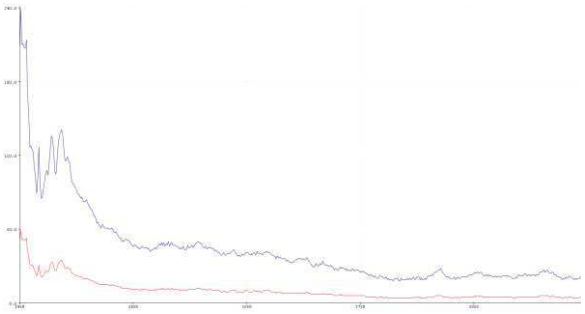


Figura 19. Señales obtenidas al tener la mano abierta.

La tabla 5 que se muestra a continuación indica los costos aproximados en los componentes e impresión del modelo.

Descripción	Costo
400 gramos de PLA	35 USD
Sensor MyoWare	36 USD
2 servomotores	13 USD
Hilo de nylon	1 USD
Microcontrolador	15 USD
Total	100 USD

Tabla 5. Costos aproximados de prototipo.

4. Conclusiones

Sin lugar a duda existe amplias oportunidades de desarrollo e investigación en el área de las prótesis accionadas con señales mioeléctricas, sin embargo, en el trabajo que presentamos deseamos enfocarnos en reducir los costos de construcción e impresión de la prótesis.

Dado lo anterior nos enfocamos a un esquema de control en lazo abierto, en donde el correcto funcionamiento del dispositivo depende de la calibración y ausencia de perturbaciones. Al no usar de sensores se logró disminuir el peso del prototipo presentado.

Por medio de simulaciones y resultados experimentales se validó la propuesta presentada, lo que garantiza un correcto funcionamiento en condiciones controladas.

Finalmente, el prototipo presentado ofrece una alternativa asequible, funcional y reproducible de una prótesis de mano, la cual después de ser homologada por las normas médicas podría ser utilizada por personas con amputación.

Referencias

[1] De Estadística y Geografía (México)., I. N. La discapacidad en México, datos al 2014-2016. 2016. [2] 1er. Apellido y 1era letra del nombre de los autores. *“Título del libro”,* Editorial, país, edición, año.

[2] Aguilar, J. P. E. Design and construction of an electromecanic prototype of transhu-meral prosthesis commanded by movements of functional arm. Scientia et Technica 21,2 (2016)

[3] Vicario Vázquez, S., O.-O. B. A. V. Z. A. J. O. LE. Sistema de reconocimiento inteligente de señales mioeléctricas del movimiento de mano humana. Ingeniería 21, 2 (2017), 41–53.

[4] D. Contreras, A. Ramírez-García, F. G. I. B. Prototipo de una prótesis mioeléctrica para la emulación de una articulación de codo. Revista mexicana de ingeniería biomédica 36, 1 (2015), 77–92.

[5] Rodríguez-García, M., D.-M. G. M. G. M. Desarrollo de una prótesis para desarticulado de muñeca controlada por señales de electromiografía. Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica. 38, 3 (2017), 602–620.

[6] Kaminski Brian, Advancer Technologies, LLC, 2015, fecha de visita 22-enero-2019 [En línea]. Disponible en: www.advancertechnologies.com

[7] Fritzing Fritzing, Universidad de Ciencias Aplicadas de Potsdam 2010, fecha de visita 8-febrero-2019. [En línea]. Disponible en: www.fritzing.org

[8] MakerBot Industries, MakerBot Inc. 2009, fecha de visita 15-febrero-2019 [En línea]. Disponible en: www.makerbot.com

[9] ETT Compañía Limitada, MG996R. 2016, fecha de visita 04-abril-2019 [En línea]. Disponible en: www.ett.co.th

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 29, pp.363 - 371, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Diseño de Aspas para un Sistema Generador de Energía Eólica

Ramírez Torres Flor, Duarte Morales Alejandra,
Cerón Franco Aureliano y Montijo Valenzuela Eliel Eduardo

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Hermosillo
Ramirez.flor@gmail.com

Resumen

La presente investigación se enfoca al diseño, construcción y evaluación de un prototipo de generador eólico de eje horizontal de velocidad variable. El objetivo es diseñar y construir un prototipo de velocidades bajas, que convierta la energía eólica en mecánica rotacional y la energía mecánica en energía eléctrica. Además, se busca contribuir al desarrollo de la explotación de la energía eólica en Hermosillo, como fuente de generación en aplicaciones aisladas de pequeña escala. En la etapa de análisis podemos mencionar que tenemos restricciones electromecánicas las cuales serán necesario tomar en cuenta, así como el cálculo de ciertas características de este sistema de generación de energía eólica. Después de obtener conclusiones en base a los cálculos realizados se procede a la selección de los elementos correctos, así como las correcciones necesarias para asegurar el funcionamiento óptimo del diseño. Como última etapa de esta investigación se procede con la experimentación del prototipo.

Palabras clave: energía, diseño, generación, implementación, energías limpias, electromecánica, prototipo, eólica.

1. Introducción

La investigación y el desarrollo tecnológico para equipos de Aero generaciones de grandes potencias conectadas a red han tenido un avance espectacular en los últimos años. En la actualidad como parte de la tendencia a producir energía limpia para reducir los niveles de contaminación, las universidades como entidades formadoras deben enfocar parte del trabajo de sus investigadores en trabajos de investigación relacionados con las fuentes alternativas de energía eléctrica.

En este trabajo se realizó el cálculo y diseño de un equipo capaz de operar a velocidades bajas y moderadas de viento, a diferencias de los equipos comerciales disponibles en el mercado, usualmente diseñados para velocidades medias y altas. El generador se diseñará y fabricará en base a las características del viento disponible que hay para la ciudad de Hermosillo Sonora, México, donde predominan los vientos de velocidades bajas, (6 km/h), que son predominantes en Hermosillo.

2. Sistemas eólicos

El viento es una fuente de energía gratuita, limpia e inagotable. Ha sido ocupada desde siglos para impulsar barcos y mover molinos; para bombear agua y moler trigo. Los molinos más antiguos, pertenecientes a la civilización persa en el siglo 7 [d.C.], eran de eje vertical y se utilizaban para la molienda y bombeo de agua.

La importancia alcanzada por la energía eólica se pone de manifiesto a través del hecho que en la actualidad está presente en la mayoría de países de economía desarrollada o emergente [1]

El interés por todas las fuentes de energía alternativas ha crecido en los últimos años y en especial las basadas en la energía producida por el viento. La potencia instalada ha supuesto un incremento notable en países como Estados Unidos, Alemania o España. Este desarrollo se ha venido dando de forma sostenida, motivado principalmente por el desarrollo de generadores eléctricos libres de emisiones de carbón [2]

A finales de 2014, se instaló un total acumulado de al menos 945,000 aerogeneradores pequeños en todo el mundo. Esto es un aumento del 8,3% (7,4% en 2013) en comparación con el año anterior, cuando se registraron 872,000 unidades. La capacidad eólica instalada en todo el mundo ha alcanzado más de 830 MW a finales de 2014. Esto representa un crecimiento del 10,9% en comparación con 2013, cuando se registraron 749MW. A nivel mundial, se puede observar un aumento en el tamaño promedio de los aerogeneradores pequeños: en 2010, el tamaño promedio instalado fue de 0,66kW, en 2011 de 0,77kW, en 2012 de 0,84kW, en 2013 de 0,85kW, y en 2014 ya ha alcanzado los 0,87kW. Todo lo anterior se ilustra en la Figura 1.

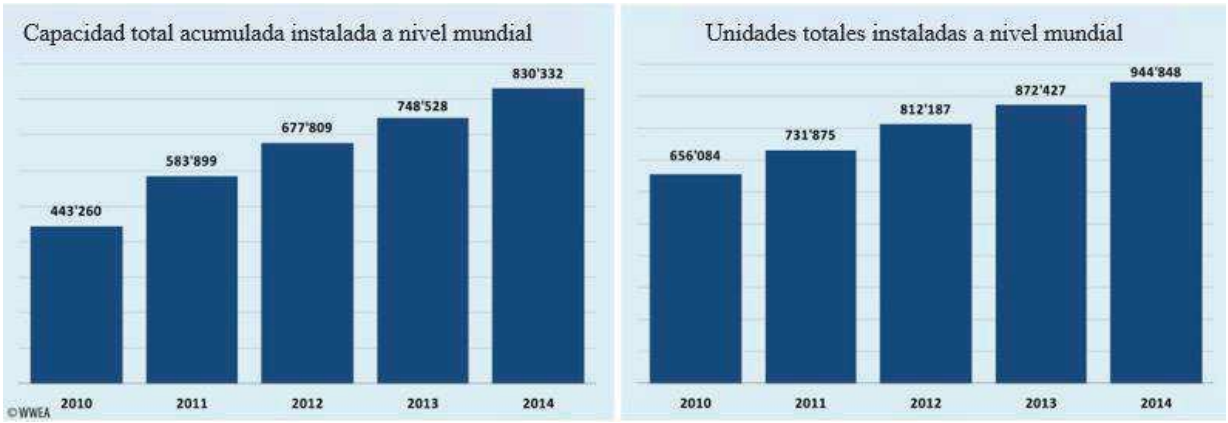


Figura 1. Tendencia actual.

La tecnología que envuelve la generación eólica es la que ha tenido el más rápido crecimiento dentro de las energías renovables.

2.1 Teoría del diseño para sistemas eólicos

En el diseño de aerogeneradores podríamos considerar las aspas y la flecha como elementos directamente relacionados con el área de diseño mecánico las cuales podemos diseñar tomando en cuenta parámetros proporcionados por cálculos electromecánicos que se abordan a continuación.

Se proponen restricciones electromecánicas, enlistadas más adelante, de acuerdo a las condiciones de velocidad del viento en la ciudad de Hermosillo, recordando que este es el lugar donde se encuentra nuestro prototipo.

Restricciones electromecánicas:

1. Velocidad mínima 6 Km/hr
2. Velocidad máxima 50 km/hr
3. Cantidad de aspas del rotor 3.
4. Altura de instalación 230 cm.

5. Potencia aproximada de diseño 600 watts.

Para determinar la potencia necesaria del generador se considera la potencia necesaria para alimentar el sistema de eléctrico del aula seleccionada.

El lugar seleccionado es el aula B33 la cual está constituida por 4 piezas de 2 lámparas cada una de 74 watts, además de 4 piezas de contactos dobles de 60 watts/C. De manera rápida:

$$Pot = (4 \times (2 \times 74) + 4 \times 60) watts = 832\, watts \quad (1)$$

De acuerdo al cálculo se requiere 832 watts para alimentar el sistema de alumbrado del salón de clases, por lo que se propone seleccionar una potencia para el generador eólico de 850 watts.

En base a las restricciones consideradas anteriormente, limita al sistema a una velocidad mínima de 6 Km/hr, y una velocidad máxima de 50 km/hr, la potencia asociada a las velocidades del viento máxima y mínima para el aerogenerador es determinada por la expresión:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * V^3 \quad (2)$$

Donde la densidad $\boldsymbol{\rho}$ del aire, considerando una temperatura de 15°C, una altura de 250 cm y presión normal es de 1.225 [kg/m2]. **A** es el área de círculo que generan las aspas que es desconocida. **V** es la velocidad del viento en km/hr. De acuerdo a la Ley de Betz dice que la razón de la potencia captada sobre la potencia del viento es una función de la razón entre el viento de entrada al rotor con respecto a la velocidad de salida, define para relación entre las velocidades de 1/3, la potencia máxima captada por el aerogenerador es 0.59 de la potencia del viento

$$Pcaptada = \frac{16}{27} * Pviento = 0.56\, Pviento \quad (3)$$

Llamando *Pcaptada* a la potencia necesaria para alimentar el sistema de alumbrado del salón, que es de 850 watts.

La potencia del viento necesaria es:

$$Pviento = \frac{Pcapatada}{0.56} = \frac{850\, watts}{0.56} = 1{,}517.86\, watts \approx 1{,}518 \quad (4)$$

$$P = 1{,}518\, \frac{N\, m}{seg} = 1{,}518\, \frac{Kgm\, m^2}{seg^3} \quad (5)$$

El área es obtenida despejándola de la ecuación 1, esta es la ecuación utilizada para determinar la potencia eólica o del viento.

$$A = \frac{2P}{\rho v^3} = \frac{2\ x\ 1{,}518\, \frac{Kgm\, m^2}{seg^3}}{1.225\, {}^{Kgm}/_{m^3}\ x\ (13.89)^3\, {}^{m^3}/_{seg^2}} = 0.925\, m^2 \quad (6)$$

El diámetro de las aspas es:

$$D = \sqrt{\left(\frac{4\ x\ A}{\pi}\right)} = \sqrt{\left(\frac{4\ x\ 0.914\, m^2}{\pi}\right)} = 1.085 \quad (7)$$

En base al diámetro determinado en la sección anterior que es de 1.085 m, se seleccionó el diámetro comercial inmediato superior, el cual es 1.24 m, el número de aspas para el aerogenerador será de 3, el material es aluminio con la configuración comercial de ángulo de ataque, como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Aspas de alumínio de 24 plugadas (0.6096 m).

Considerando que el diámetro comercial de aspas seleccionado para el aerogenerador es de 1.24 m, se corrigen las potencias.

Calculo del área de sección transversal

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(1.24m)^2}{4} = 1.20763\ m^2 \tag{8}$$

Calculo de la potencia eólica o potencia del aire utilizando la ecuación 1

$$Paire = 0.5\ x\left(1.225\ \frac{Kgm}{m^3}\right)\ x\ 1.20763m^2\ x\ \left(13.89\frac{m}{seg}\right)^3 = 1{,}982.20\ \frac{Kgm\,m^2}{seg^3} = 1{,}982.20\ \frac{N\,m}{seg} = 1{,}982.20\ watts \tag{9}$$

Calculo de la potencia captada por el generador de acuerdo a la ecuación 3

$$Pcaptada = 0.56\ Pviento = 0{,}56\ x\ 1980.20\ watts = 1{,}108.91\ watts \tag{10}$$

Ahora enfocándonos a la selección de la flecha de transmisión que se acopla a la masa que forma parte del conjunto aspas-hub-contrapeso (A-H-C), empezaremos con la selección del diámetro para lo cual es necesario conocer el par de torsión, la velocidad angular relacionada con la velocidad máxima del viento. Empezamos con el cálculo del torque o momento torsional se lleva a cabo considerando la potencia del viento relacionada con la velocidad máxima del viento de 50 km/hr (13.89 m/seg), cuyo valor es 1,928.27 Watts

La ecuación utilizada para determinar el par de torsión es:

$$P = T\ x\ \omega \tag{11}$$

Donde ω es la velocidad angular que es obtenida mediante la expresión:

$$v = r\ x\ \omega \tag{12}$$

La r es el radio de la circunferencia generada por giro de las aspas alrededor del eje del generador, y es 0.62 m, dado que el diámetro es 1.24 m, ω es la velocidad máxima del aerogenerador y es 50 km/hr (13.89 m/seg), por lo que:

$$\omega = \mathrm{v/r} = \ (13.89\ \mathrm{m}\ /\ \mathrm{seg})/(0.62\ \mathrm{m}) = 22.403\ \mathrm{rad}\ /\ \mathrm{seg} \tag{13}$$

La frecuencia relacionada con esta velocidad es dada por:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{22.403\ {}^{rad}/_{seg}}{2\pi} = 3.566\ Hz \tag{14}$$

La velocidad circular asociada a la frecuencia es:

$$n = 60\ x\ f = \left(60\ {}^{seg}/_{min}\right)\ x\ \left(3.566\ {}^{ciclos}/_{seg}\right) = 213.96\ RPM \tag{15}$$

Por lo que el par de torsión T obtenida de despejar la ecuación 6 es:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{1928.27\ \frac{N\ m}{seg}}{22.403\ {}^{rad}/_{seg}} = 86.072\ N\ M \tag{16}$$

Una vez conocido el par de torsión o torque (T) el paso siguiente es determinar el área de sección transversal de la flecha de transmisión. Por lo general las flechas integradas la masa (rotor) de un generador de energía eléctrica es acero hot rolled 1018, cuyas propiedades mecánicas de acuerdo, como se muestran en la tabla 1.

Densidad ρ	7.87 grf/cm3
Dureza	116 Brinell; 66 Rockwel B
Resistencia a la tensión ultima Su	400 MPa
Resistencia a la tensión ultima Su	220 MPa
Módulo de elasticidad	200 MPa
Módulo de rigidez al cortante G	80 GPa
Relación de Poisson	0.29

Tabla 1. AISI 1018 Steel, hot rolled, 19-32 mm (0.75-1.25 in) round

El esfuerzo cortante es

$$\tau = \frac{V}{A} \tag{17}$$

El par de torsión es

$$T = F\ x\ r \tag{18}$$

Haciendo F = V entonces si

$$F = \frac{T}{r} \tag{19}$$

y

$$A = \pi x r^2 \tag{20}$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{T/r}{\pi r^2} = \frac{T}{\pi r^3} \tag{21}$$

Es decir:

$$r = \sqrt[3]{\frac{T}{\pi x r}} \tag{22}$$

Haciendo a $\tau = \tau per = 85.067\ MPa$ y sabiendo que $T = 86.072\ N\ m$

Entonces:

$$r_{per} = \sqrt[3]{\frac{T}{\pi x \tau_{per}}} = \sqrt[3]{\frac{86.072\ N\ m}{\pi x\ 85.067\ x 10^{6} N/m^2}} = \sqrt[3]{3.2207\ x\ 10^{-7} m^3} = 0.006855\ m \tag{23}$$

Expresado el radio en cm

$$r_{per} = 0.6855\ cm \tag{24}$$

Por los que el diámetro de la flecha es:

$$D_{per} = 2\ x\ 0.6855\ cm = 1.371\ cm \tag{25}$$

3. Sistemas de control

Un sistema de control es aquel en el que la salida del sistema se controla para tener un valor específico o cambiarlo, según lo determina la entrada del sistema. Existen dos formas básicas de sistemas de control, una es la denominada en lazo abierto y la otra en lazo cerrado. En un sistema en lazo abierto, la entrada se elige con base en la experiencia que se tiene con dicho sistema para producir el valor de salida requerido. Por el contrario, en un sistema de control de lazo cerrado se tiene una señal de realimentación hacia la entrada desde la salida, la cual se utiliza para modificar la entrada de modo que la salida se mantenga constante a pesar de los cambios en las condiciones de operación. [3]

Un sistema de control ideal debe ser capaz de conseguir su objetivo cumpliendo los siguientes requisitos:

1. Garantizar la estabilidad y particularmente, ser robusto frente a perturbaciones y errores en los modelos.
2. Ser tan eficiente como sea posible, según un criterio preestablecido. Normalmente este criterio consiste en que la acción de control sobre las variables de entrada sea realizable, evitando comportamientos bruscos e irreales.
3. Ser fácil de implementar y cómodo de operar en tiempo real con ayuda de un ordenador.

Los elementos básicos que forman parte de un sistema de control y permiten su manipulación son los siguientes:

• Sensores. Permiten conocer los valores de las variables medidas del sistema.
• Controlador. Utilizando los valores determinados por los sensores y la consigna impuesta, calcula la acción que debe aplicarse para modificar las variables de control en base a cierta estrategia.
• Actuador. Es el mecanismo que ejecuta la acción calculada por el controlador y que modifica las variables de control.

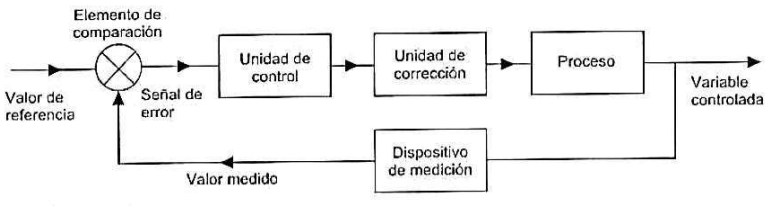


Figura 3. Esquema General de un Sistema de Control de lazo cerrado [4]

Un sistema que mantiene una relación determinada entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control, se denomina sistema de control realimentado.

El sistema de control en un algoritmo secuencial que itera, junto a la adquisición de las variables proporcionadas por los distintos sensores (variables de entrada), actualizando las variables de salida que manejaran: la conmutación del conversor DC-DC y la resistencia de desahogo del sistema. Mediante el uso de un PIC 18f4550 para controlar en lazo cerrado la velocidad el motor. Consta de un sensor de velocidad, el cual es un disco de plástico con ranuras que gira junto al eje del generador. Se aprovecha la ranura para abrir y cerrar la transmisión entre un transmisor y un receptor puestos uno frente al otro. El disco gira libremente entre dos diodos y consta de 20 perforaciones a lo largo de su perímetro, lo que permite tener 20 pulsos por cada revolución del rotor, la señal es un tren de pulsos que será leído por el microcontrolador. Los sensores de voltajes están constituidos por un divisor de tensión y acoplados a un seguidor de voltaje conformados por un OPAMP. El sensor de corriente es de efecto Hall. Esta entrega una señal de voltaje lineal respecto a la magnitud de corriente que circula por el conductor. El Push-Pull es una interfaz electrónica que permite un correcto manejo de la compuerta Mosfet utilizada por el conversor DC-DC. Los convertidores DC-DC son circuitos electrónicos de potencia que convierten una tensión continua en otro nivel de tensión y, normalmente, proporciona una salida regulada.

4. Resultados

Con relación a las aspas de aerogenerador La potencia aproximada necesaria calculada para alimentar el aula en cuestión fue de 850 Watt. El diámetro calculado en base a la velocidad máxima de 50 km/hr fue de 1.085 m. Se seleccionó un aerogenerador comercial de 3 aspas de aluminio con diámetro de 1.24 m. Con el diámetro comercial se corrigieron la potencia eólica y la potencia captada y se generó una gráfica, mostrada en la figura 4, que proporciona la potencia para diferentes velocidades de viento entre 6 y 50 km/hr.

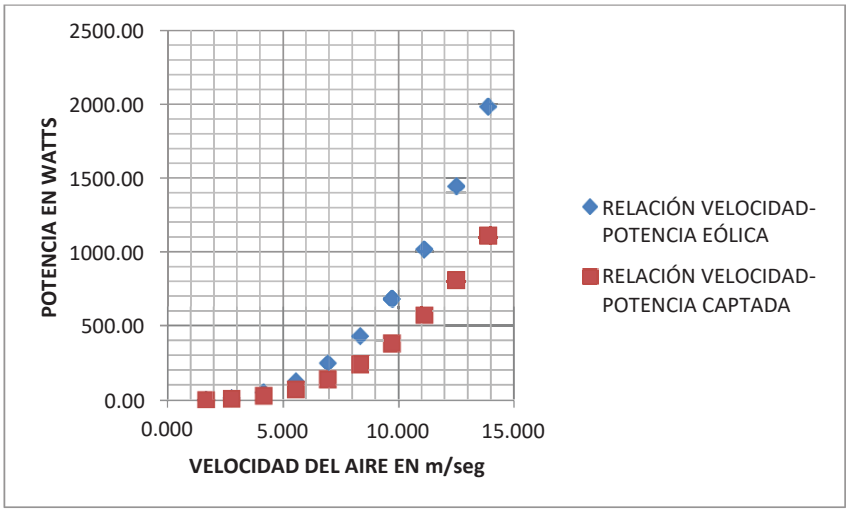


Figura 4. Gráfica que muestra la relación entre la velocidad del viento y las potencias

En el proceso de selección del diámetro de la flecha de transmisión se obtuvo lo siguiente:

a) El momento torsional o torque relacionado con la velocidad máxima de 50 km/hr y la potencia máxima de 1,928.27 Watts fue de 86.072 N-m.

b) También bajo esas condiciones la velocidad angular ω fue de 22.403 rad/seg, la frecuencia f, fue de 3.566 Hz, los rpm resultantes son 213.96.

c) Se determinó el esfuerzo de cedencia al corte para el acero 1018 rolado en caliente y su valor fue de 127.6 MPa.

d) El esfuerzo cortante permisible fue de 85.067 MPa, considerando un factor de seguridad de 1.5.

e) Se determinó el diámetro permisible para la flecha de transmisión basado en los datos de torque, esfuerzo cortante permisible y este fue 1.371 cm

5. Conclusiones

En las secciones anteriores se discutieron los factores principales para lograr una eficiencia global del 56%. Según la Figura 3. Este resultado está dentro de lo esperado.

Es posible mejorar este resultado resolviendo los errores cometidos y dando soluciones alternativas adecuadas. La experiencia conseguida trabajando en la implementación de este prototipo otorga una visión más clara sobre la explotación eólico y sus desafíos. También demuestra la posibilidad de producir productos parecidos, por lo menos en lo que concierne a los sistemas Mecatrónicos.

Como se anticipó, la corrección de los problemas y errores localizados logrará mejorar el desempeño del aerogenerador.

El sistema de control propuesto es básico. No obstante, se pueden programar otros algoritmos basados en otra estrategia de control (adaptivo, lógica difusa, etc.) sin tener que cambiar la interfaz electrónica (Hardware).

Hay un gran rango de potencias generadas que no tienen el voltaje adecuado para ser transferidas a consumos o baterías. Por esto es fundamental utilizar un convertidor de corriente continua para elevar el voltaje al nivel deseado. La electrónica de potencia entrega soluciones para interconectar eléctricamente a distintos aerogeneradores que proporcionan su energía en voltaje continuo.

Referencias

[1] Villarrubia, M., *"Ingeniería de la energía eólica"*, Marcombo, España, 1ª. Edición, 2012.
[2] González, M., Vázquez, F., Morilla, F., "*Control Multivariable centralizado con desacoplo para aerogeneradores de velocidad variable"*, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. Comité Español de Automática, Volumen 7, Número 4, páginas 53-64, 2010.
[3] Bolton, W., *"Ingeniería de control",* Alfaomega, México, 2ª. edición, 2011.
[4] Bolton, W., "*Mecatrónica, Sistemas de control electrónico en la ingeniería Mecánica y Eléctrica*", Alfaomega, México, 3ª. Edición, 2006.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 30, pp.372 - 383, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Implementación de Filtro Kalman en Microcontrolador para Sistema VLC

Cortés Aguilar Teth Azrael, Tovar Arriaga Adriana y González Paz Luis Andrés

Departamento de Ingeniería Electrónica y Sistemas Computacionales
Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez
Campus Zapopan, Camino Arenero No. 1101, Col. El Bajío, C.P. 45019, Jalisco, México
teth.cortes@zapopan.tecmm.edu.mx

Resumen

El presente proyecto propone la implementación en un microcontrolador del algoritmo del Filtro Kalman para la detección de señales de luz visible con presencia de bajo ruido. Mediante un procedimiento recursivo las ecuaciones de predicción y actualización del algoritmo del filtro Kalman permiten realizar la estimación del valor de una variable que presenta aleatoriedad. Su implementación en sistemas electrónicos de bajo costo puede aportar una mejora en el desarrollo de sistemas de comunicación por luz visible VLC. Los resultados experimentales demuestran que los parámetros iniciales propuestos para el caso de un sensor, simplifican las ecuaciones del algoritmo del Filtro Kalman para su fácil programación en un microcontrolador.

Palabras clave: Comunicación por luz visible, Filtro Kalman, microcontrolador

1. Nomenclatura

IMU	Inertial Measurement Unit
KF	Kalman Filter
LED	Light Emitting Diode
PWM	Pulse Width Modulation
RF	Radio Frequency
VLC	Visible Light Communication

2. Introducción

El algoritmo del filtro Kalman es un estimador cuadrático lineal que realiza la predicción de una variable desconocida a partir de mediciones de una señal en tiempo real que presenta ruido. El filtro Kalman ha encontrado numerosas aplicaciones para navegación, control de vehículos autónomos y predicción de trayectorias en robótica, usualmente se implementa en una computadora conectada a un sistema de adquisición de datos, sin embargo, también se han desarrollado algunas aplicaciones para microcontroladores y sistemas embebidos de bajo costo para tratar señales de sensores inerciales IMU [1] y sensores ultrasónicos [2].

Inventado por Rudolph Emil Kalman a finales de la década de 1950. El filtro KF es un conjunto de ecuaciones del tipo Predictor-Corrector propuestas como un algoritmo de procesamiento de datos discretos que realiza una predicción seguida de una corrección para determinar el siguiente estado o

estimación de una variable desconocida, al ingresar información sobre la dinámica del sistema [3]. La etapa de predicción del algoritmo está compuesta por la ecuación (1) de estimación a priori de x_k y por la ecuación (2) de la estimación de la covarianza del error a priori.

$$\hat{x}_k^{(-)} = F_k \hat{x}_{k-1} + B_k \vec{u}_k \tag{1}$$

$$P_k^{(-)} = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k \tag{2}$$

La etapa de actualización o corrección del algoritmo está compuesta por la ecuación (3) para el cálculo de la ganancia del filtro KF, la cual indica la confianza en los parámetros observados, empleando la incertidumbre de los mismos junto con la calidad de los datos medidos, la ecuación (4) es la estimación a posteriori de x_k, es decir, la actualización del estado a partir de la medición z_k y la ecuación (5) es la actualización a posteriori de la covarianza del error [4].

$$K_k = \left(P_k^{(-)} H_k^T\right)\left(H_k P_k^{(-)} H_k^T + R_k\right)^{-1} \tag{3}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^{(-)} + K_k(z_k - H_k \hat{x}_k^{(-)}) \tag{4}$$

$$P_k = P_k^{(-)} - K_k H_k P_k^{(-)} \tag{5}$$

Para el caso de una señal con ruido medida por un sensor, suponemos como condiciones iniciales los parámetros propuestos por Al Tahtawi [2] para las ecuaciones del filtro KF; suponiendo que la salida del sensor es la misma en un lapso de tiempo corto, $F_k = 1$ relaciona el estado en el instante *k-1* con el estado en el instante *k*, en ausencia de señales de control. Suponiendo que no hay un sistema de control en la entrada, $B_k = 0$ relaciona las señales de control con el estado actual; además el vector de control $\vec{u}_k$ se puede omitir para sistemas simples. Suponiendo que la señal del sensor es la única variable observable, $H_k = 1$ relaciona el estado actual con las observaciones del entorno. La señal z_k son los datos medidos por el sensor en el instante *k* que tienen una incertidumbre. El parámetro Q_k representa la covariancia del ruido de las observaciones y se establece arbitrariamente para ajustar la amplitud de la curva de la señal estimada [5]. R_k es la varianza de la señal z_k y se calcula con la ecuación (6) a partir de mediciones experimentales previas a la implementación del filtro KF.

$$R_k = \frac{\Sigma(z_k - \bar{z}_k)^2}{(k-1)} \tag{6}$$

En la ecuación (6) $\bar{z}_k$ es la media de la variable z_k, para una muestra de tamaño *k*. El objetivo del filtro KF es minimizar el error cuadrático medio entre el dato actual y el dato estimado [6]. En la figura 1 se muestra el flujo de información [7] en el algoritmo del filtro KF para un sistema lineal.

2.1. Microcontrolador

Para la prueba del sistema de comunicación VLC del presente proyecto se utilizaron dos microcontroladores ATmega328 instalados en dos tarjetas Arduino; el primero lleva a cabo la transmisión de la información en la forma de una señal modulada por ancho de pulso que modula la intensidad de la luz de un Led y el segundo recibe la señal lumínica y recupera la forma de onda a

partir del algoritmo del filtro KF programado en su memoria interna. La programación de ambos microcontroladores se realizó en la aplicación del entorno de desarrollo de las tarjetas. Las razones para la selección de estos componentes son: su bajo costo, rápida implementación, bajo consumo de energía y porque uno de los objetivos del proyecto es demostrar la posibilidad del programar el algoritmo del filtro KF que se muestra en la figura 1 en un sistema de bajo rendimiento como es el caso de un microcontrolador embebido en una tarjeta de desarrollo en comparación con un sistema de mayor costo y rendimiento como puede ser un equipo de cómputo conectado a un sistema de adquisición de señales y donde el algoritmo del filtro KF se ejecuta desde un software avanzado como matlab [6].

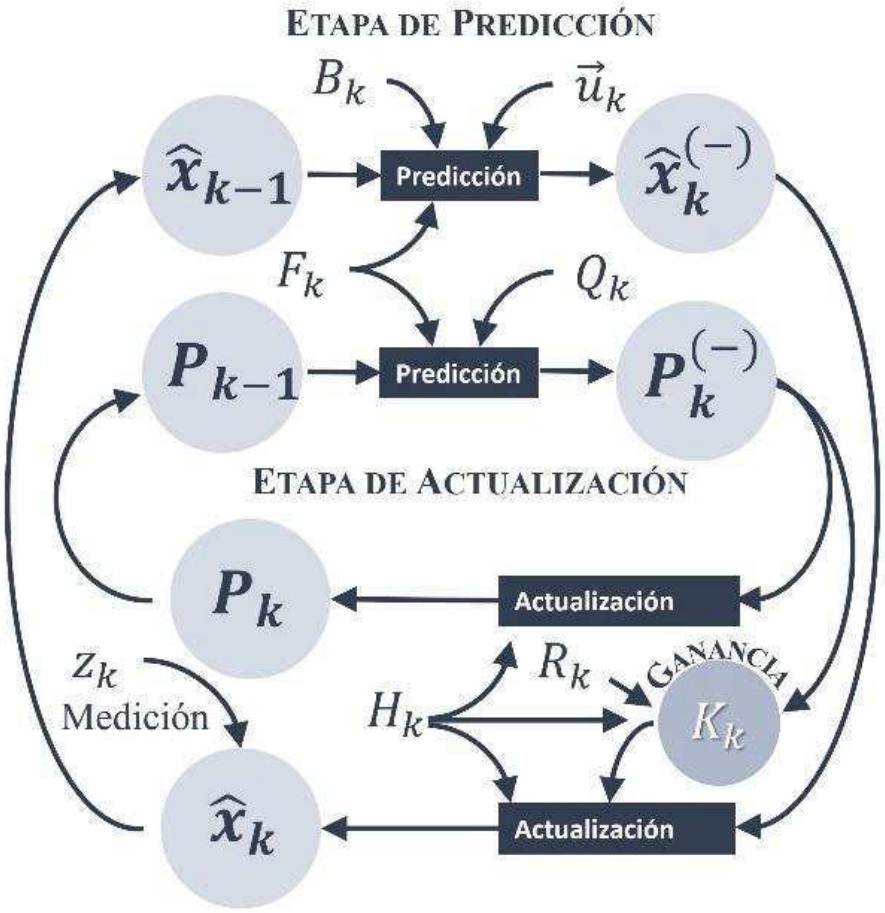


Figura 1. Flujo de información en el filtro KF.

2.2. Comunicación por luz visible

Los sistemas de comunicación por luz visible VLC usan la región del espectro electromagnético de 430THz a 790THz que corresponde de 380nm a 750nm de longitud de onda. Los sistemas VLC aportan soluciones a problemas típicos de los sistemas de RF como son ancho de banda y disponibilidad de frecuencias libres, además las fuentes de luz visible pueden utilizarse tanto para iluminación como comunicaciones, lo que representa un ahorro de energía respecto a los sistemas de comunicaciones por RF [8]. Algunas aplicaciones potenciales de los sistemas VLC incluyen Li-Fi para internet de hasta 10Gbps, comunicación entre vehículos para advertencias de colisión, accidentes o violación de infracciones, control de robots en hospitales, donde el uso de ondas electromagnéticas

está prohibido por su interferencia con equipos médicos, otras aplicaciones son despliegue de información en pantallas, comunicaciones subacuáticas y comunicaciones satelitales.

Algunas investigaciones recientes reportan el uso de sistemas VLC para detectar distancia entre vehículos en movimiento y la aplicación del filtro Kalman como método de compensación para reducir la estimación del error en cámaras de baja resolución [9].

La modulación por ancho de pulso PWM es una de las técnicas utilizadas para las comunicaciones por luz visible VLC, para bajas tasas de transmisión de 4.8kbps aproximadamente. Se debe considerar que en baja frecuencia la señal PWM puede presentar efectos de intermitencia o centelleo perceptibles para la visión humana. También se debe considerar que la señal PWM regula la intensidad de la luz, y en algunas aplicaciones se requiere mantener un nivel de iluminación adecuado, por ejemplo, en una oficina se necesitan de 450lux a 500lux. Por otro lado PWM tiene como ventaja su fácil implementación y bajo costo en sistemas electrónicos que utilizan un LED en el transmisor y fotodiodos o fotoceldas en el receptor.

En el presente proyecto se utilizó una señal PWM para transmitir la información de la distancia entre un objeto y un sensor infrarrojo de reflexión. Los resultados obtenidos muestran que bajo condiciones de bajo ruido el algoritmo del filtro Kalman programado en el microcontrolador del receptor es capaz de recuperar satisfactoriamente la forma de onda de la señal de luz transmitida.

3. Metodología

Para recuperar una señal que presenta ruido, es común en los sistemas electrónicos utilizar filtros a base de amplificadores operacionales para discriminar frecuencias no deseadas, donde se supone se localiza el ruido, sin embargo, esto implica el uso de hardware adicional al microcontrolador. Además cuando el ruido afecta las frecuencias dentro de la banda de paso del filtro, la recuperación de la señal es más complicada y se requiere del uso de métodos distintos. Por otro lado, el filtro Kalman es un algoritmo recursivo que permite estimar o recuperar una señal en el dominio del tiempo, que únicamente requiere la programación de una serie de ecuaciones en un microcontrolador, prescindiendo del uso de hardware adicional, además al no operar en el dominio de la frecuencia, el filtro KF puede predecir el comportamiento de una variable desconocida afectada por el ruido en su ancho de banda, minimizando el error cuadrático medio del dato actual de la señal z_k y del dato estimado x_k, bajo ciertas condiciones iniciales las ecuaciones se pueden simplificar, facilitando su programación en un microcontrolador.

En la figura 2 se muestra el circuito de prueba del sistema de comunicación VLC, con el algoritmo del filtro KF programado en el microcontrolador µC2. Un sensor infrarrojo de reflexión GP2Y0A21 esta conectado al microcontrolador µC1 y mide la distancia respecto a un objeto que tiene enfrente, la distancia al objeto es la información que se desea transmitir a través del sistema VLC. El microcotrolador µC1 genera una señal PWM de 25Hz con un ciclo de trabajo en función de la distancia detectada por el sensor GP2Y0A21, la señal PWM modula la corriente de un led de 5mm que emite luz blanca de 6000K de temperatura de color y 5,500mcd de intensidad lumínica a 90° de ángulo de visión, que realiza la función de transmisor.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 30, pp.372 - 383, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

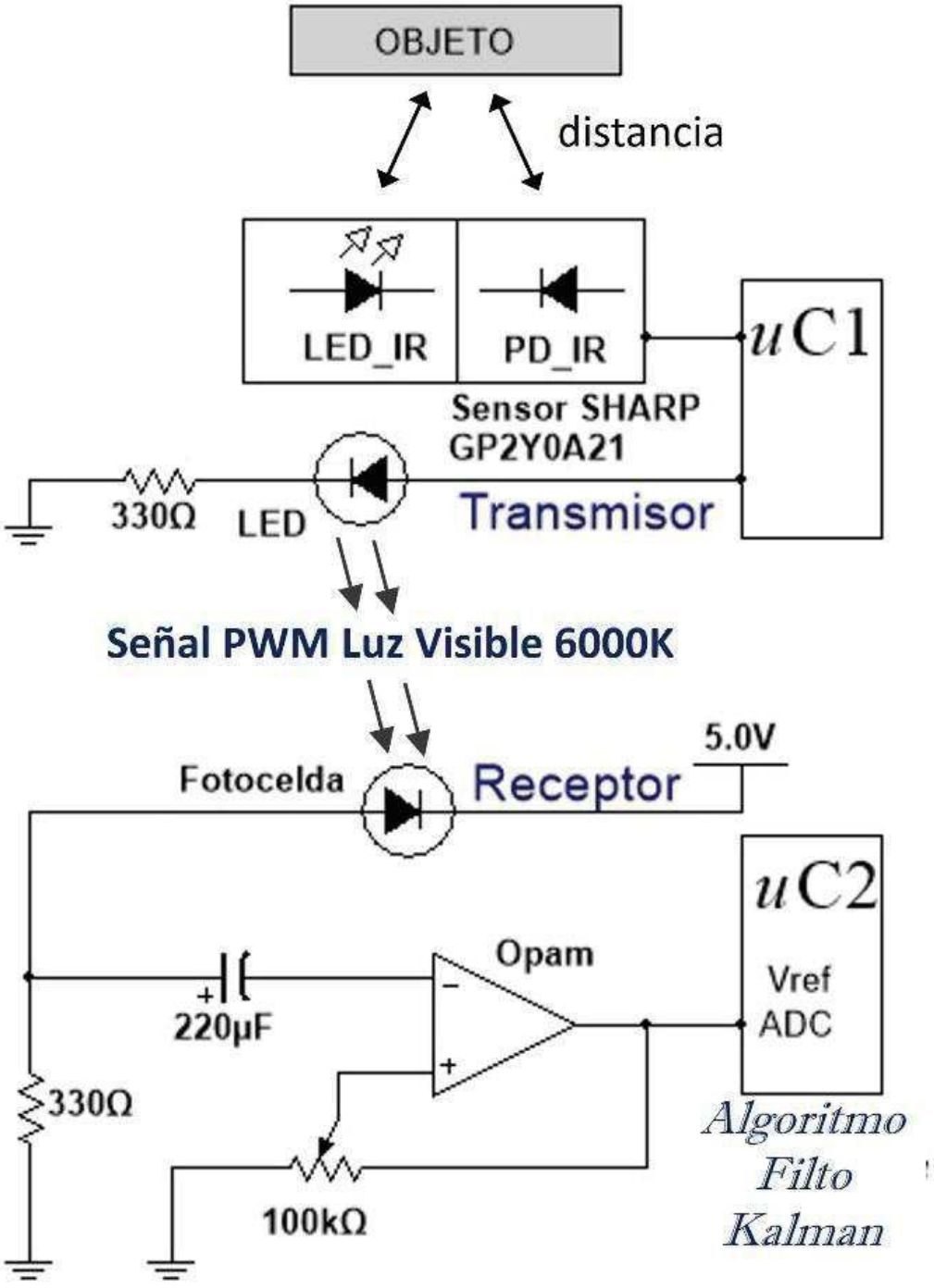


Figura 2. Diagrama conceptual del sistema de prueba de comunicación VLC.

La señal de luz visible PWM llega a una fotocelda, que convierte la señal de luz en una señal de corriente, después la señal es amplificada antes de entrar a un convertidor analógico digital embebido en el microcontrolador μC2, el cual tiene programado el código del algoritmo del filtro Kalman. Las ecuaciones simplificadas del filtro KF, bajo las suposiciones iniciales, se programaron en C++ en un microcontrolador ATmega328. Las ecuaciones para la etapa de predicción son:

$$\hat{x}_k^{(-)} = \hat{x}_{k-1} \tag{7}$$

$$P_k^{(-)} = P_{k-1} + Q \tag{8}$$

Las ecuaciones para la etapa de actualización son:

$$K_k = \left(P_k^{(-)}\right)\left(P_k^{(-)} + R_k\right)^{-1} \tag{9}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^{(-)} + K_k(z_k - \hat{x}_k^{(-)}) \tag{10}$$

$$P_k = (1 - K_k)P_k^{(-)} \tag{11}$$

Los resultados se obtuvieron graficando la señal PWM, con presencia de bajo ruido z_k que recibe el microcontrolador μC2 y la señal de predicción por el filtro Kalman, resultado del cálculo de $\hat{x}_k^{(-)}$ de la ecuación (7). Ambos datos son enviados a través de un puerto USB hacia una computadora. La varianza de la señal R_k se obtuvo experimentalmente y se aproximó a un valor de 2,500. El parámetro Q_k se estableció arbitrariamente en 800, en las simulaciones previas del filtro KF se observó que valores inferiores distorsionaban la señal de predicción en los flancos de subida y de bajada de la señal PWM.

3.1. Codificación del algoritmo del filtro Kalman para simulación

En la tabla 1 se muestra el código del filtro Kalman para una señal PWM con un ciclo de trabajo fijo, definido en la configuración de los parámetros iniciales, programado en el microcontrolador μC2, antes de probar el filtro KF en el circuito de la figura 2 para una comunicación VLC. El primer segmento de código corresponde a la declaración de variables. En el segundo segmento de código se configuran los parámetros iniciales de las variables T_L, T_H, S_H, S_L, T, y DC que definen la señal PWM, así como las variables Q_k, R_k y XL de las ecuaciones del algoritmo del filtro Kalman, el rango de aleatoriedad que afecta la señal PWM se delimita con el valor asignado a las variables Vmin y Vmax. También se establece la tasa de comunicación de 9600 bps entre la tarjeta de desarrollo y la computadora para la transferencia de datos en tiempo real.

En el tercer segmento de código de la tabla 1 se generan tres señales. Las variables S_L y S_H son la referencia ideal del nivel en bajo y en alto respectivamente de la señal PWM. La señal Zk representa el dato real de la señal de referencia más un valor aleatorio N generado por la instrucción random. La señal XP corresponde al dato estimado por las ecuaciones de predicción (7) y (8) y de actualización (9), (10) y (11) simplificadas del filtro Kalman. El bucle está conformado por dos instrucciones for consecutivas para generar la parte de la señal del ciclo en bajo y en alto. Dentro de cada instrucción for se genera primero la señal de referencia S_L ó S_H a la cual se le suma un valor aleatorio N, generando la señal Zk. Después se ejecutan las ecuaciones del filtro KF y se calcula el valor estimado de la señal XP. Los datos de las tres señales S_L ó S_H, Zk y XP se envían por USB hacia una computadora donde se almacenan en memoria en un archivo de texto y posteriormente se grafican desde un software como matlab o excel, también es posible graficar en tiempo real; para el

caso del circuito de prueba de comunicación VLC de la figura 2 se desarrolló un código sencillo en processing para observar el comportamiento de las variables.

Tabla 1. Código de simulación del Filtro Kalman para una señal PWM

Descripción	Segmento de código
Declaración de variables	// 1er segmento de código int Zk; int Q, Vmin, Vmax, k, N, S_L, S_H; float R, DC; floaT XP, Pk, K, XL, PL; int T, T_H, T_L ;

Configuración de parámetros para iniciales	// 2do segmento de código
	void setup() {
	Serial.begin(9600);
	Q=1000; // Valor arbitrario para ajustar curva de predicción
	R=400; // Varianza para random(Vmin,Vmax)
	XL=0;
	Vmin= 0;
	Vmax= 30;
	S_L=20; // Valor mínimo de la señal
	S_H=120; // Valor máximo de la señal
	DC=0.3; // Ciclo de trabajo
	T=50; // periodo
	T_H=T*DC; // tiempo en alto
	T_L=T-T_H; // tiempo en bajo
	}

Bucle de generación de las señales:
S_L Referencia nivel bajo
S_H Referencia nivel alto
Zk Dato real más ruido
XP Dato estimado por las ecuaciones del filtro Kalman
 	
Las tres señales de la parte del ciclo en bajo son
	// 3er segmento de código
	void loop() {
	for (int k = 0 ; k <= T_L; k += 1) {
	N=random(Vmin,Vmax); // variable aleatoria Vmin y Vmax
	Zk=S_L+N; // Dato real+ ruido
	// Ecuaciones de Kalmann
	// Predicción
	XP=XL;
	Pk=PL+Q;
	// Actualización
	K=Pk/(Pk+R);
	XL=XP+K*(Zk-XL);
	PL=(1-K)*Pk;
	Serial.print(S_L); // Referencia
	Serial.print(",");
	Serial.print(Zk); // Dato actual del sensor

enviadas por el puerto USB de la tarjeta de desarrollo hacia una computadora
.
	Serial.print(",");
	Serial.println(XP); // Dato estimado por el filtro Kalman
	delay(T);
	}

La primera instrucción for del bucle genera las señales en la parte del periodo en alto y La segunda instrucción for del bucle genera las señales de la parte del periodo en bajo de la señal PWM	for (int k = 0 ; k <= T_H; k += 1) {
	N=random(Vmin,Vmax); // variable aleatoria Vmin y Vmax
	Zk=S_H+N; // Dato real+ ruido
	// Ecuaciones de Kalmann
	// Predicción
	XP=XL;
	Pk=PL+Q;
	// Actualización
	K=Pk/(Pk+R);
	XL=XP+K*(Zk-XL);
	PL=(1-K)*Pk;

Las tres señales de la parte del ciclo en alto son enviadas por el puerto USB de la tarjeta de desarrollo hacia una computadora	Serial.print(S_H); // Referencia
	Serial.print(",");
	Serial.print(Zk); // Dato actual del sensor
	Serial.print(",");
	Serial.println(XP); // Dato estimado por el filtro Kalman
	delay(T);
	}
	}

La simulación del filtro Kalman propuesto antes de su prueba en el circuito de comunicación por luz visible de la figura 2, obedece a la necesidad de analizar los resultados de su implementación en un microcontrolador, en un entorno donde sea posible delimitar la aleatoriedad que afecta una señal; como se lleva a cabo al establecer los valores de las variables Vmin y Vmax en las instrucciones N=random(Vmin,Vmax) y Zk=S_H+N ó Zk=S_L+N del tercer segmento de código de la tabla 1.

A través de las simulaciones se dedujo que un valor menor a 400 en la variable Q afecta la forma de onda de la señal estimada XP en sus flancos de subida y bajada. La varianza R de la señal se calculó con la ecuación (6) a partir de los datos enviados a la computadora desde la variable Zk; posteriormente se estableció el valor de R en el código. Se siguió el mismo procedimiento para el cálculo de R para el caso del circuito de prueba de comunicación por luz visible VLC propuesto en la figura 2.

Como trabajo futuro proponemos incluir una subrutina para el cálculo de la varianza R de la señal Zk, anterior a las ecuaciones del algoritmo del filtro Kalman, de tal manera que el proceso de cálculo se automatice, sin embargo, se debe considerar que este código adicional puede afectar el computo de la estimación de la señal XP para frecuencias altas de Zk, limitando la aplicación del algoritmo del filtro Kalman para ciertas frecuencia de la señal Zk y del tiempo de latencia de operación del microcontrolador.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 30, pp.372 - 383, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

4. Resultados

Como se mencionó en la sección de metodología, antes de probar el filtro KF del circuito de la figura 2 se simuló en el microcontrolador μC2 una señal z_k con un rango de aleatoriedad para sus valores de -5 a 5 como se muestra en la figura 3 para el caso de bajo ruido. En la figura 4 el rango de aleatoriedad de los valores de z_k se incrementó de -10 a 10.

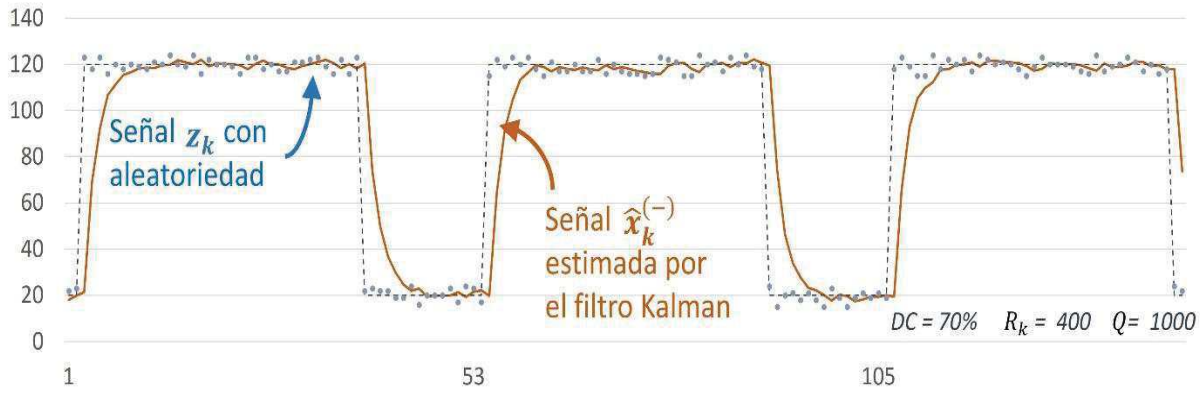


Figura 3. Simulación del filtro KF con aleatoriedad de -5 a 5 en la señal z_k.

El rango de la aleatoriedad de las señales z_k simuladas se ingresaron como parámetros de la función *random(min,max)* programada en el microcontrolador μC2 previamente al cálculo de las ecuaciones de filtro KF.

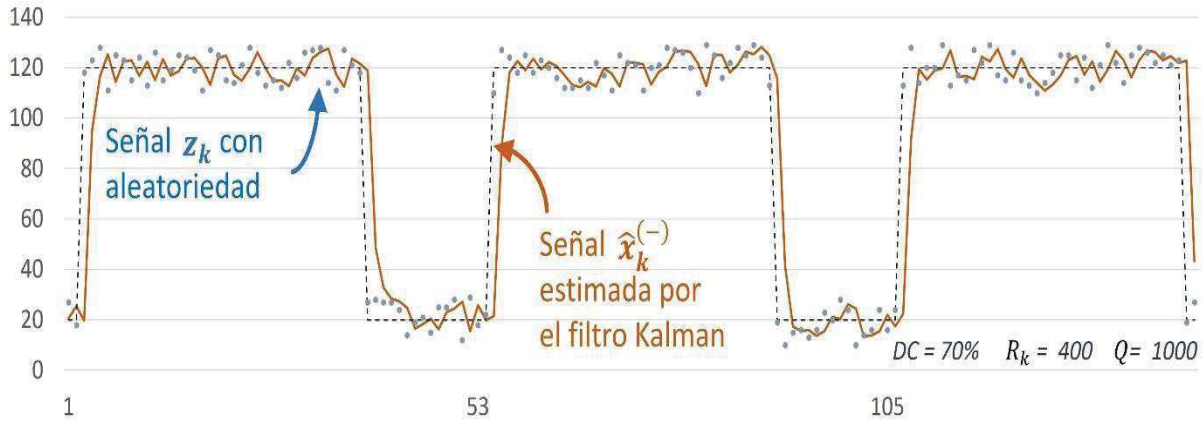


Figura 4. Simulación del filtro KF con aleatoriedad de -10 a 10 en la señal z_k.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 30, pp.372 - 383, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Del análisis de las simulaciones de figura 3 y figura 4 se estableció que un valor de Q_k entre 800 y 1000 era conveniente para la prueba del circuito de la figura 2. La varianza de $R_k = 400$ de las simulaciones corresponde a la aleatoriedad de los datos durante el tiempo del ciclo en alto.

En la figura 5 se muestran las gráficas de las señales z_k y $\hat{x}_k^{(-)}$ enviadas por el microcontrolador µC2 hacia la computadora. Los datos del sistema VLC de prueba se obtuvieron en condiciones ideales con bajo ruido o aleatoriedad en la señal z_k, con el propósito de verificar el comportamiento del filtro KF. El receptor del sistema VLC recuperó la señal de luz modulada por el led del transmisor.

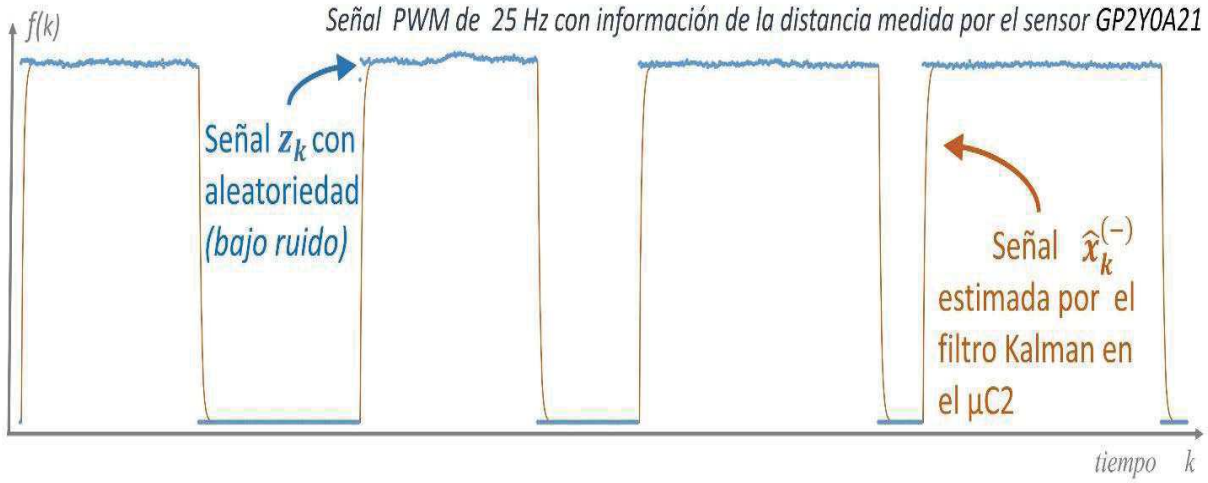


Figura 5. Graficas de las señales z_k y $\hat{x}_k^{(-)}$ enviadas por el µC2.

En la figura 6 se muestran dos secciones resaltadas del tiempo en alto de las señales z_k y $\hat{x}_k^{(-)}$, donde se observa que la señal de predicción del filtro Kalman $\hat{x}_k^{(-)}$ está centrada respecto a los valores aleatorios de la señal z_k, este comportamiento demuestra que el filtro KF programado en el µC2 logra predecir y recuperar la información de manera aceptable.

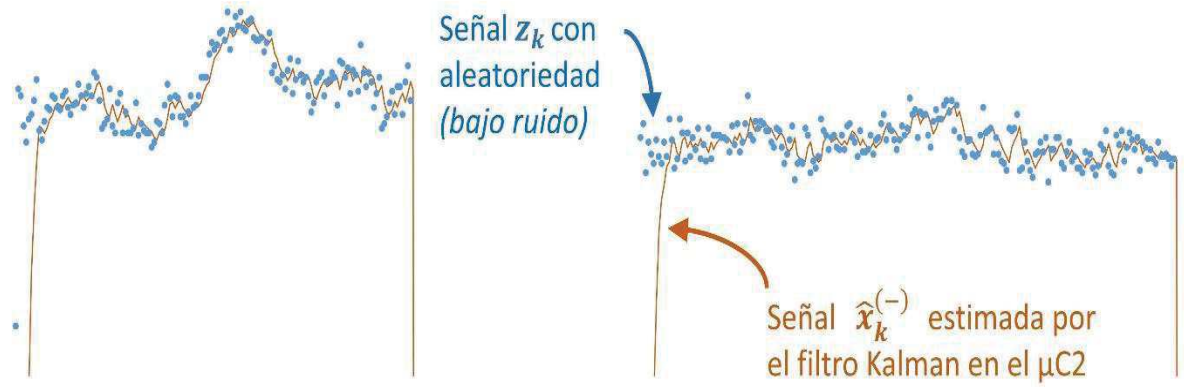


Figura 6. Sección resaltada del tiempo en alto de las señales z_k y $\hat{x}_k^{(-)}$.

Cabe señalar que el porcentaje del ciclo de trabajo de la señal PWM se restringió a un rango conveniente para garantizar suficiente intensidad de luz en el receptor. La grafica de la figura 5 se realizó para una distancia de transmisión menor a 30cm entre el Led del transmisor y la fotocelda del receptor, distancias mayores aumentan la dispersión de la luz y la intensidad recibida en la fotocelda.

5. Conclusiones

Para el caso de un sensor y bajo ciertas suposiciones, se pueden simplificar las ecuaciones de predicción y actualización del algoritmo del filtro Kalman de tal manera que pueden programarse fácilmente en un microcontrolador.

Las ecuaciones simplificadas de predicción y actualización del algoritmo del filtro Kalman programadas en el microcontrolador se simularon en un entorno controlado para una señal PWM afectada por ruido con aleatoriedad delimitada, del análisis de sus resultados se establecieron los valores adecuados para las variables Q_k y R_k que utilizan las ecuaciones del algoritmo del filtro Kalman.

Se logró demostrar el funcionamiento del filtro Kalman, programado en un microcontrolador para recuperar la información de una señal modulada por ancho de pulso enviada a través de un sistema real de prueba de comunicación por luz visible VLC.

Proponemos como trabajo futuro incluir una subrutina anterior a las ecuaciones del algoritmo del filtro Kalman para automatizar el cálculo de la varianza R_k de la señal afectada por el ruido, pero se debe considerar el tiempo de latencia del microcontrolador para el caso del análisis de señales de frecuencia alta.

Como trabajo futuro proponemos verificar el comportamiento del filtro Kalman para señales con una mayor presencia de ruido, como puede ser el caso de dos o más transmisores operando simultáneamente y cuyas señales logren llegar al receptor.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo recibido para la realización y difusión del presente proyecto al departamento de Ingeniería Electrónica, departamento de Ingeniería en Sistemas Computacionales, departamento de Posgrado e Investigación y Dirección del campus Zapopan del Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez adscrito al Tecnológico Nacional de México.

Referencias

[1] Ferdinando, H., Khoswanto, H., & Purwanto, D. (2012). Embedded Kalman Filter for Inertial Measurement Unit (IMU) on the ATMega8535. IEEE Xplore, 1-5. doi:10.1109/INISTA.2012.6246978

[2] Al Tahtawi, A. R. (Marzo de 2018). Kalman Filter Algorithm Design for HC-SR04 Ultrasonic Sensor Data Acquisition System. IJITEE, 2(1), 15-19. doi:https://doi.org/10.22146/ijitee.36646

[3] Welch G., & Bishop , G. (7 de Julio de 2016). The Kalman Filter. Recuperado el 8 de Marzo de 2019, de www.cs.unc.edu/~welch/kalman

[4] Grewal M.S. (2011) Kalman Filtering. In: Lovric M. (eds) International Encyclopedia of Statistical Science. Springer, Berlin, Heidelberg https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2

[5] Lacey, T. (1998). Tutorial: the Kalman Filter. Recuperado el 15 de Febrero de 2019, de http://web.mit.edu/kirtley/kirtley/binlustuff/literature/control/Kalman%20filter.pdf

[6] Rhudy, M. B., Salguero, R. A., & Holappa, K. (2017). Kalman filtering tutorial for undergraduate students. International Journal of Computer Science & Engineering Survey, 8(1), 1-18. doi:10.5121/ijcses.2017.8101

[7] Bzarg. (11 de Agosto de 2015). How a Kalman filter works, in pictures. Recuperado el 5 de Marzo de 2019, de www.bzarg.com/p/how-a-kalman-filter-works-in-pictures/

[8] Khan, L. U. (2017). Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges. Digital Communications and Networks, vol 3 (2) pp. 78-88, disponible en: https://doi.org/10.1016/j.dcan.2016.07.004

[9] Tram, V. T. B & Yoo M. (2018) Vehicle-to-Vehicle Distance Estimation Using a Low-Resolution Camera Based on Visible Light Communications, IEEE Access, vol. 6 pp. 4521 – 4527, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2793306

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 31, pp.384 – 403, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Análisis de Modelos Dinámicos de un Vehículo Aéreo no Tripulado tipo Quadrotor

Allende Peña Jacobo Marcos[1–2], Rodríguez Paredes Salvador Antonio[1], Salmerón Quiroz Benito Bernardino[1], Guzmán Martínez Marisela[1] y Quintero Guzmán Cesar [2]

[1]Instituto Politécnico Nacional, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Azcapotzalco, Ciudad de México, México.
[2]Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco Estado de México, México.
jacobmarcoap@gmail.com

Resumen

Se presenta el desarrollo y análisis de un modelo no lineal para un vehículo aéreo tipo quadrotor, así mismo se presenta una simplificación al modelo desarrollado y se compara contra un modelo reducido comúnmente utilizado en la literatura con el fin de observar la equivalencia de ambos modelos. Inicialmente, se aborda el modelado de la aeronave mediante ecuaciones de Euler-Lagrange, después se analiza una simplificación lineal de este modelo, luego se aborda una simplificación que nos permite observar la equivalencia con un modelo reducido, posteriormente se proponen dos simplificaciones mediante pequeño ángulo, la primera aproximación propuesta corresponde en aplicar series de Taylor a la matriz de inercias y a la matriz de Coriolis del sistema no lineal inicial; mientras que la segunda simplificación propuesta se basa en aplicar las aproximaciones a la matriz de inercias y luego obtener mediante esta simplificación la matriz de Coriolis. Se presentan simulaciones que permiten comparar el comportamiento de los modelos y también se propone un controlador para cada modelo reducido, el cual consiste en compensar la dinámica del sistema, para luego asignar una dinámica que a priori es estable, dichos controladores se aplican al modelo inicial no lineal, para ser evaluados bajo las mismas condiciones de simulación y comparar la utilidad de los modelos reducidos al diseñar un controlador para estabilizar al sistema.

Palabras clave: Quadrotor, modelos dinámicos, Euler-Lagrange, Newton-Euler, reducción de modelo, linealización, comparación de modelos, linealización exacta y control.

1. Introducción

En los últimos años el auge de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) ha tenido gran impacto en la sociedad, el área de posibles aplicaciones aumenta día con día, por ejemplo; en el campo de la milicia, el comercio, la búsqueda, el rescate, el monitoreo de entornos peligrosos, la entrega de productos, así como otros [1], [2], [3], [4].

En la actualidad, existe una gran variedad de UAV's; sin embargo, los más populares se basan en un diseño de cuatro rotores conocido como quadrotor o cuadricóptero. Los cuadricópteros son inestables por naturaleza y por esta razón se implementan metodologías de control para que funcionen de forma segura y se comporten de manera estable; el control de estos dispositivos puede mejorar si se conoce de forma adecuada el modelo que describe el comportamiento dinámico; es así que una de las principales problemáticas a la hora de generar un sistema de control para un vehículo aéreo, es desarrollar un modelo que cumpla con las características de ser lo más preciso al describir el comportamiento dinámico real de la aeronave y a su vez que sea suficientemente simple para diseñar, analizar y estudiar diversas estrategias de control, así como para implementar de forma simple el controlador en un sistema digital, por ejemplo un microcontrolador o un sistema embebido.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 31, pp.384 – 403, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

El modelo matemático del quadrotor es un conjunto de ecuaciones que permite representar de forma detallada el comportamiento dinámico del cuadricóptero en vuelo; existen principalmente dos aproximaciones, la primera que definiremos como modelo completo es desarrollado mediante la metodología de Euler-Lagrange y la cual consiste en observar las velocidades angulares del vehículo, desde un marco de referencia, movible pero alineado a un marco inercial [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]. Por otro lado, se encuentra un modelo desarrollado mediante Newton-Euler, que observa las velocidades angulares del quadrotor desde un marco móvil definido en el centro de rotación de la aeronave, el cual conoceremos como modelo reducido [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22]. Además, existen aproximaciones lineales, en las cuales frecuentemente se aproxima la dinámica de vuelo alrededor de un punto de operación [23], [24], [25].

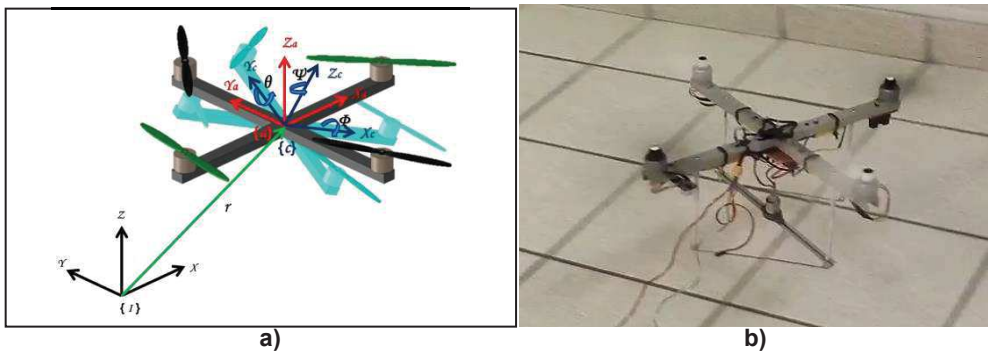
Es así que en este trabajo se analiza el modelo vía Euler-Lagrange de un quadrotor, tal como se propone en [9], [10], [11], [12], [13], posteriormente se obtiene un modelo mediante linealización aproximada, se realizan aproximaciones que nos permiten representar el modelo completo en un modelo reducido, tal como el propuesto en [14], [15], [16], [17], luego en función de series de Taylor se simplifica la dinámica de rotación del modelo completo. Posteriormente estos modelos simplificados se someten a simulación en lazo abierto para comparar su comportamiento contra el modelo no lineal completo y finalmente se propone un controlador para observar la utilidad de las aproximaciones al diseñar controladores en lazo cerrado.

2. Modelado de la aeronave

En esta sección se describe la metodología para obtener el modelo no lineal que define el comportamiento dinámico de traslación y rotación del quadrotor, para desarrollar dicho modelo se utiliza el formalismo Euler-Lagrange y sus ecuaciones derivadas, es decir; la ecuación general de movimiento que describe la dinámica de un robot. Por lo que, para describir el modelo, se deduce una matriz de inercias y una matriz de fuerzas centrípetas y de Coriolis, esta última matriz se obtiene mediante los símbolos de Christoffel y se compara con una matriz de Coriolis reportada en la literatura [11], [13].

2.1 Posiciones y velocidades

La aplicación del formalismo Euler-Lagrange, requiere del cálculo de la energía cinética y potencial del sistema a modelar, por ello se requiere el cálculo de las posiciones y velocidades de traslación y rotación. En la figura 1 se aprecian los marcos de referencia utilizados para el modelado, así como el prototipo de referencia.



a) b)

Figura 1. a) marcos de referencia, b) prototipo del quadrotor.

De acuerdo a la figura 1, un punto del marco de referencia {c} expresado en el marco {a}, queda definido como [9], [10], [11], [12], [13]:

$$ {}^{a}\boldsymbol{P} = \begin{pmatrix} cos\psi & -sin\psi & 0 \\ sin\psi & cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} cos\theta & 0 & sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -sin\theta & 0 & cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos\phi & -sin\phi \\ 0 & sin\phi & cos\phi \end{pmatrix} ({}^{c}\boldsymbol{P}) \quad (1) $$

$$ {}^{a}\boldsymbol{P} = \begin{pmatrix} cos\theta cos\psi & cos\psi sin\theta sin\phi - cos\phi sin\psi & sin\phi sin\psi + cos\phi cos\psi sin\theta \\ cos\theta sin\psi & cos\phi cos\psi + sin\theta sin\phi sin\psi & cos\phi sin\theta sin\psi - cos\psi sin\phi \\ -sin\theta & cos\theta sin\phi & cos\theta cos\phi \end{pmatrix} ({}^{c}\boldsymbol{P}) \quad (2) $$

Además, la velocidad angular ($\boldsymbol{\Omega}$) del quadrotor definida en el marco {a}, se expresa como [9], [10], [11], [12], [13].

$$ \boldsymbol{\Omega} = \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{\omega c}} \dot{\boldsymbol{\eta}} \quad (3) $$

$$ \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos\phi & sin\phi \\ 0 & -sin\phi & cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos\phi & sin\phi \\ 0 & -sin\phi & cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} cos\theta & 0 & -sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ sin\theta & 0 & cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \quad (4) $$

$$ \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -sin\theta \\ 0 & cos\phi & sin\phi cos\theta \\ 0 & -sin\phi & cos\phi cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \quad (5) $$

2.2 Fuerzas

De acuerdo con la figura 2, la fuerza de empuje o fuerza de sustentación en el marco de referencia {c} se define:

$$ f_e = (f_{e1} + f_{e2} + f_{e3} + f_{e4}) \quad (6) $$

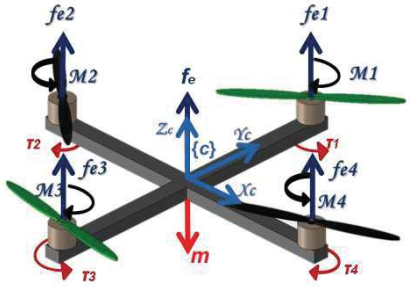


Figura 2. Diagrama de cuerpo libre

La fuerza de empuje f_{ei} para cada motor que se define por:

$$ f_{ei} = k_e \omega_i^2 \quad (7) $$

La fuerza de arrastre aerodinámico τ_i, que se opone al torque M_i generado por la rotación de las hélices, se expresa como:

$$ T_i = k_a \omega_i^2 \quad (8) $$

Donde ω_i es la velocidad angular de cada motor, k_a *y* k_b son constantes definidas positivas que dependen de la densidad del aire, el radio de rotación, el área y la forma de las palas de la hélice, así como de otros factores.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 31, pp.384 – 403, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

La fuerza de empuje actúa sobre el eje "$\mathcal{Z}$" del marco de referencia {*c*}, por lo que la fuerza de sustentación en el marco de referencia inercial queda:

$$ {}^{I}\boldsymbol{f} = \begin{pmatrix} cos\psi & -sin\psi & 0 \\ sin\psi & cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} cos\theta & 0 & sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -sin\theta & 0 & cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos\phi & -sin\phi \\ 0 & sin\phi & cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_e \end{pmatrix} \quad (9) $$

$$ {}^{I}\boldsymbol{f} = \begin{pmatrix} f_e sin\phi sin\psi + f_e cos\phi cos\psi sin\theta \\ f_e cos\phi sin\theta sin\psi - f_e cos\psi sin\phi \\ f_e cos\theta cos\phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_e(sin\phi sin\psi + cos\phi cos\psi sin\theta) \\ f_e(cos\phi sin\theta sin\psi - cos\psi sin\phi) \\ f_e(cos\theta cos\phi) \end{pmatrix} \quad (10) $$

2.3 Movimientos de la aeronave

En la figura 3, se muestra los movimientos de rotación que se desarrollan en el quadrotor. $\boldsymbol{l}$, es la distancia perpendicular que existe entre cada una de las fuerzas de empuje ejercidas y el centro de rotación del sistema.

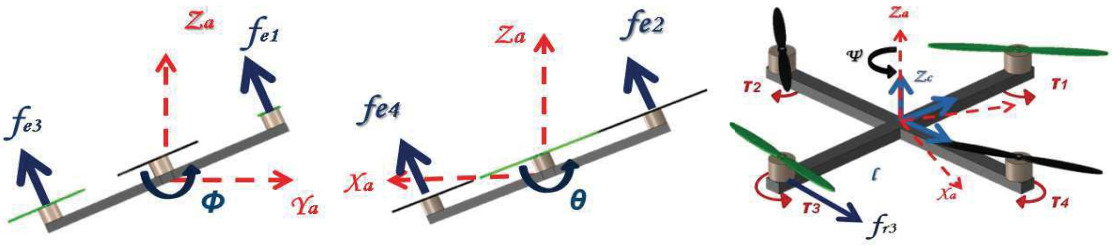


Figura 3. Movimientos del quadrotor

La rotación de un ángulo Φ $(roll)$, se logra mediante una diferencia en las fuerzas f_{e1} y f_{e3}, tal que:

$$ \tau_\phi = l(f_{e1} - f_{e3}) \quad (11) $$

A su vez la rotación de un ángulo θ $(pitch)$, se logra mediante una diferencia en las fuerzas f_{e2} y f_{e4}, lo que produce un torque:

$$ \tau_\theta = l(f_{e2} - f_{e4}) \quad (12) $$

Para obtener una rotación de un ángulo ψ (Yaw), se logra mediante una diferencia en los momentos $(T_3 + T_1)$ y $(T_2 + T_4)$, lo que produce:

$$ \tau_\psi = [(T_3 + T_1) - (T_2 + T_4)] \quad (13) $$

Además, se puede expresar el torque de arrastre aerodinámico como:

$$ T_i = l f_{ri} = l k_r f_{ei} \quad (14) $$

Donde $\boldsymbol{f_{ri}}$ es la fuerza perpendicular a la longitud $\boldsymbol{l}$ y k_r relaciona f_{ei} con f_{ri}

Por lo que la ecuación (13) se puede reescribir como:

$$ \tau_\psi = l[(f_{r3} + f_{r1}) - (f_{r2} + f_{r4})] \quad (15) $$

2.4 Ecuaciones de Euler-Lagrange

La energía cinética total se modela:

$$k = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{r}}^{\boldsymbol{T}} m\dot{\boldsymbol{r}} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\Omega}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{I}\boldsymbol{\Omega} \quad (16)$$

Por otro lado, la energía potencial queda definida como:

$$V = mg({}^{I}\boldsymbol{Z}) \quad (17)$$

Debido a que la energía cinética rotacional y la energía cinética de traslación no tienen términos dependientes, entonces se puede separar a las ecuaciones de traslación y de rotación [9], [10], [11], [12], [13], por lo que el Lagrangiano, para cada una queda:

$$\boldsymbol{L_t} = K_t - V = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{r}}^{\boldsymbol{T}} m\dot{\boldsymbol{r}} - mg\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ {}^{I}\boldsymbol{Z} \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\boldsymbol{L_r} = K_r - V_r = \frac{1}{2}\boldsymbol{\Omega}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{I}\boldsymbol{\Omega} \quad (19)$$

Ahora para el modelo de traslación las ecuaciones de Euler-Lagrange se plantean como:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial}{\partial \dot{\boldsymbol{r}}}\boldsymbol{L_t}\right) - \left(\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{r}}\boldsymbol{L_t}\right) = ({}^{I}\boldsymbol{f}) \quad (20)$$

$$m\begin{bmatrix}\ddot{x}\\ \ddot{y}\\ \ddot{z}\end{bmatrix} + mg\begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix} = \begin{pmatrix} f_e(sin\phi sin\psi + cos\phi cos\psi sin\theta) \\ f_e(cos\phi sin\theta sin\psi - cos\psi sin\phi) \\ f_e(cos\theta cos\phi) \end{pmatrix} \quad (21)$$

Por lo que se obtiene el modelo que define la dinámica de traslación:

$$\begin{pmatrix}\ddot{x}\\ \ddot{y}\\ \ddot{z}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (sin\phi sin\psi + cos\phi cos\psi sin\theta)\frac{f_e}{m} \\ (cos\phi sin\theta sin\psi - cos\psi sin\phi)\frac{f_e}{m} \\ -g + (cos\theta cos\phi)\frac{f_e}{m} \end{pmatrix} \quad (22)$$

Para el modelo de rotación, se tiene que la energía cinética es:

$$\boldsymbol{L_r} = \boldsymbol{K_r} - \boldsymbol{V_r} = \frac{1}{2}\boldsymbol{\Omega}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{I}\boldsymbol{\Omega} \quad (23)$$

Recordando (3) y (5) se obtiene:

$$\boldsymbol{L_r} = \frac{1}{2}(\boldsymbol{T_{\omega c}}\dot{\boldsymbol{\eta}})^T\boldsymbol{I}(\boldsymbol{T_{\omega c}}\dot{\boldsymbol{\eta}}) = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\eta}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{\omega c}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{I}\boldsymbol{T_{\omega c}}\dot{\boldsymbol{\eta}} \quad (24)$$

Definiendo la matriz de Inercias como:

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{\omega c}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{I}\boldsymbol{T_{\omega c}} \quad (25)$$

Por lo que la energía cinética en coordenadas generalizadas es:

$$\boldsymbol{L_r} = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\eta}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}} \quad (26)$$

De las ecuaciones de Euler-Lagrange se plantea:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial}{\partial\dot{\boldsymbol{\eta}}}\boldsymbol{L_r}\right)-\left(\frac{\partial}{\partial\boldsymbol{\eta}}\boldsymbol{L_r}\right)=\boldsymbol{\tau} \quad (27)$$

$$\frac{\partial}{\partial\dot{\boldsymbol{\eta}}}\boldsymbol{L_r}=\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{\eta}} \quad (28)$$

$$\frac{d}{dt}(\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}})-\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial\boldsymbol{\eta}}\left(\dot{\boldsymbol{\eta}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}}\right)=\boldsymbol{\tau} \quad (29)$$

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\eta})\ddot{\boldsymbol{\eta}}+\dot{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}}-\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial\boldsymbol{\eta}}\left(\dot{\boldsymbol{\eta}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}}\right)=\boldsymbol{\tau} \quad (30)$$

Definiendo la matriz de Coriolis como:

$$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{n},\dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}}=\dot{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}}-\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial\boldsymbol{\eta}}\left(\dot{\boldsymbol{\eta}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}}\right) \quad (31)$$

Se obtiene el modelo dinámico que describe la rotación del quadrotor.

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\eta})\ddot{\boldsymbol{\eta}}+\boldsymbol{C}(\boldsymbol{n},\dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}}=\boldsymbol{\tau} \quad (32)$$

Si se considera una estructura simétrica en la aeronave, la matriz de inercias adquiere la forma [9], [10], [11], [12], [13]:

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\eta})=\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{\omega c}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{I}\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{\omega c}}=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&cos\phi&-sin\phi\\-sin\theta&cos\theta sin\phi&cos\theta cos\phi\end{pmatrix}\begin{pmatrix}I_x&0&0\\0&I_y&0\\0&0&I_z\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1&0&-sin\theta\\0&cos\phi&sin\phi cos\theta\\0&-sin\phi&cos\phi cos\theta\end{pmatrix} \quad (33)$$

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\eta})=\begin{pmatrix}I_x&0&-I_x sin\theta\\0&I_y\cos^2\phi+I_z\sin^2\phi&I_y cos\theta cos\phi sin\phi-I_z cos\theta cos\phi sin\phi\\-I_x sin\theta&I_y cos\,\theta cos\phi sin\phi-I_z cos\theta cos\phi sin\phi&I_z\cos^2\theta\cos^2\phi+I_y\cos^2\theta\sin^2\phi+I_x\sin^2\theta\end{pmatrix} \quad (34)$$

A su vez la matriz de Coriolis se define como:

$$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{n},\dot{\boldsymbol{\eta}})=\begin{pmatrix}c_{11}&c_{12}&c_{13}\\c_{21}&c_{22}&c_{23}\\c_{31}&c_{32}&c_{33}\end{pmatrix} \quad (35)$$

La matriz de Coriolis y fuerzas centrípetas, representan una desviación del movimiento de traslación debido a su componente de rotación. Las fuerzas centrípetas y de Coriolis satisfacen las siguientes propiedades [26]:

1) La matriz de fuerzas centrípetas y de Coriolis $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{n},\dot{\boldsymbol{\eta}})$ no es única, pero el vector $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{n},\dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}}$ si lo es.
2) Cuando el vector de velocidades articulares es cero, la matriz de Coriolis satisface $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{n},\boldsymbol{0})=\boldsymbol{0}$.
3) La diferencia de la derivada con respecto al tiempo de la matriz de inercia $\dot{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{\eta})$ y la matriz de fuerzas centrípetas y de Coriolis $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{n},\dot{\boldsymbol{\eta}})$ resultan ser una matriz antisimétrica, es decir; $\dot{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{\eta})-2\boldsymbol{C}(\boldsymbol{n},\dot{\boldsymbol{\eta}})$ es una matriz antisimétrica.

Para definir los componentes de la matriz $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{n},\dot{\boldsymbol{\eta}})$, se consideran y comparan dos casos, por un lado se obtienen los componentes de la matriz de Coriolis mediante la matriz de Inercias (34) y los símbolos de Christoffel, un segundo caso hace uso de la matriz de Coriolis definida por [11],[13], donde los componentes de la matriz se expresan como:

$$\boldsymbol{C_a(n,\dot{\eta})} = \begin{pmatrix} c_{a11} & c_{a12} & c_{a13} \\ c_{a21} & c_{a22} & c_{a23} \\ c_{a31} & c_{a32} & c_{a33} \end{pmatrix} \quad (36)$$

$$\begin{cases} c_{a11} = 0 \\ c_{a12} = (I_y - I_z)\left(\dot{\theta}\cos\phi\sin\phi + \dot{\psi}\sin^2\phi\, cos\theta\right) + (I_Z - I_y)\dot{\psi}\cos^2\phi\cos\theta - I_x\dot{\psi}\cos\theta \\ c_{a13} = (I_Z - I_y)(\dot{\psi}\cos\phi\sin\phi\cos^2\theta) \\ c_{a21} = (I_z - I_y)\left(\dot{\theta}\cos\phi\sin\phi + \dot{\psi}\sin^2\phi\cos\theta\right) + (I_y - I_z)\left(\dot{\psi}\cos^2\phi\cos\theta\right) + I_x\dot{\psi}\cos\theta \\ c_{a22} = (I_z - I_y)(\dot{\phi}\cos\phi\sin\phi) \\ c_{a23} = -I_x\dot{\psi}\sin\theta\cos\theta + I_y\dot{\psi}\sin^2\phi\cos\theta\sin\theta + I_z\dot{\psi}\cos^2\phi\sin\theta\cos\theta \\ c_{a31} = (I_y - I_z)(\dot{\psi}\cos^2\theta\sin\phi\cos\phi) - I_x\dot{\theta}\cos\theta \\ c_{a32} = (I_Z - I_y)\left(\dot{\theta}\cos\phi\sin\phi\sin\theta + \dot{\phi}\sin^2\phi\, cos\theta\right) + (I_y - I_z)\left(\dot{\phi}\cos^2\phi\cos\theta\right) + I_x\dot{\psi}\sin\theta\cos\theta \\ \quad -I_y\dot{\psi}\sin^2\phi\cos\theta\sin\theta - I_z\dot{\psi}\cos^2\phi\sin\theta\cos\theta \\ c_{a33} = (I_y - I_z)(\dot{\phi}\cos\phi\sin\phi\cos^2\theta - I_y\dot{\theta}\sin^2\phi\cos\theta\sin\theta - I_z\dot{\theta}\cos^2\phi\cos\theta\sin\theta + I_x\dot{\theta}\cos\theta\sin\theta) \end{cases}$$

Para hallar la matriz de Coriolis a partir de la matriz de inercias (34) y los símbolos de Christoffel se tiene:

$$C_{kj} = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{3}\left(\frac{\partial \boldsymbol{M_{kj}}}{\partial \boldsymbol{\eta_i}} + \frac{\partial \boldsymbol{M_{ki}}}{\partial \boldsymbol{\eta_j}} - \frac{\partial \boldsymbol{M_{ij}}}{\partial \boldsymbol{\eta_k}}\right)\dot{\boldsymbol{\eta}}_i \quad (37)$$

$$C_{kj} = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial \boldsymbol{M_{kj}}}{\partial \phi} + \frac{\partial \boldsymbol{M_{k1}}}{\partial \boldsymbol{\eta_j}} - \frac{\partial \boldsymbol{M_{1j}}}{\partial \boldsymbol{\eta_k}}\right)\dot{\phi} + \left(\frac{\partial \boldsymbol{M_{kj}}}{\partial \theta} + \frac{\partial \boldsymbol{M_{k2}}}{\partial \boldsymbol{\eta_j}} - \frac{\partial \boldsymbol{M_{2j}}}{\partial \boldsymbol{\eta_k}}\right)\dot{\theta} + \left(\frac{\partial \boldsymbol{M_{kj}}}{\partial \psi} + \frac{\partial \boldsymbol{M_{k3}}}{\partial \boldsymbol{\eta_j}} - \frac{\partial \boldsymbol{M_{3j}}}{\partial \boldsymbol{\eta_k}}\right)\dot{\psi}\right] \quad (38)$$

Entonces la matriz que se obtiene mediante los símbolos de Christoffel es:

$$\boldsymbol{C_b(n,\dot{\eta})} = \begin{pmatrix} c_{b11} & c_{b12} & c_{b13} \\ c_{b21} & c_{b22} & c_{b23} \\ c_{b31} & c_{b32} & c_{b33} \end{pmatrix} \quad (39)$$

$$\begin{cases} c_{b11} = 0 \\ c_{b12} = \frac{1}{2}\left[(\sin 2\phi)(I_y - I_z)\dot{\theta} + \left(-I_x\cos\theta - \frac{1}{2}(2\cos\theta\cos^2\phi - 2\cos\theta\sin^2\phi)(I_y - I_z)\right)\dot{\psi}\right] \\ c_{b13} = \frac{1}{2}\left[\left(-I_x\cos\theta - \frac{1}{2}(2\cos\theta\cos^2\phi - 2\cos\theta\sin^2\phi)(I_y - I_z)\right)\dot{\theta}\right] \\ \quad + \frac{1}{2}\left[\left(-\frac{1}{4}(I_y - I_z)(4\cos\phi\sin\phi + 4\cos^2\theta\cos\phi\sin\phi - 4\cos\phi\sin^2\theta\sin\phi)\right)\dot{\psi}\right] \\ c_{b21} = \frac{1}{2}\left[-(\sin 2\phi)(I_y - I_z)\dot{\theta} + \left(\frac{1}{2}(2\cos\theta\cos^2\phi - 2\cos\theta\sin^2\phi)(I_y - I_Z) - I_x\cos\theta\right)\dot{\psi}\right] \\ c_{b22} = \frac{1}{2}\left[-(\sin 2\phi)(I_y - I_z)\dot{\phi}\right] \\ c_{b23} = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{1}{2}(2\cos\theta\cos^2\phi - 2\cos\theta\sin^2\phi)(I_y - I_z) + I_x\cos\theta\right)\dot{\phi}\right] \\ \quad + \frac{1}{2}\left[\left(-\left(-2I_z\cos\theta\cos^2\phi\sin\theta + 2I_y(\cos\theta\sin\theta)\left(\frac{1}{2}\cos 2\phi - \frac{1}{2}\right) + 2I_x\cos\theta\sin\theta\right)\right)\dot{\psi}\right] \\ c_{b31} = \frac{1}{2}\left[\left(-I_x\cos\theta + \frac{1}{2}(2\cos\theta\cos^2\phi - 2\cos\theta\sin^2\phi)(I_y - I_z)\right)\dot{\theta}\right] \\ \quad + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{1}{4}(I_y - I_z)(4\cos\phi\sin\phi\cos^2\theta - 4\, cos\,\phi\sin\phi\sin^2\theta + 4\cos\phi\sin\phi)\right)\dot{\psi}\right] \\ c_{b32} = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{1}{2}(2\cos\theta\cos^2\phi - 2\cos\theta\sin^2\phi)(I_y - I_z) - I_x\cos\theta\right)\dot{\phi} + \left(-\frac{2}{4}(I_y - I_z)(4\cos\phi\sin\theta\sin\phi)\right)\dot{\theta}\right] \\ \quad + \frac{1}{2}\left[\left(-\left(-2I_z\cos\theta\cos^2\phi\sin\theta + 2I_y(\cos\theta\sin\theta)\left(\frac{1}{2}\cos 2\phi - \frac{1}{2}\right) + 2I_x\cos\theta\sin\theta\right)\right)\dot{\psi}\right] \\ c_{b33} = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{1}{4}(I_y - I_z)(4\cos\phi\sin\phi\cos^2\theta - 4\, cos\,\phi\sin\phi\sin^2\theta + 4\cos\phi\sin\phi)\right)\dot{\phi}\right] \\ \quad + \frac{1}{2}\left[\left(-2I_z\cos\theta\cos^2\phi\sin\theta + 2I_y(\cos\theta\sin\theta)\left(\frac{1}{2}\cos 2\phi - \frac{1}{2}\right) + 2I_x\cos\theta\sin\theta\right)\dot{\theta}\right] \end{cases}$$

Como se observa la matriz definida por (36) es distinta a la matriz definida por (39), sin embargo cuando cada matriz se multiplica por el vector de velocidades angulares resultan ser el mismo vector, es decir $\boldsymbol{C_a(n,\dot{\eta})\dot{\eta}} = \boldsymbol{C_b(n,\dot{\eta})\dot{\eta}}$ tal que; se cumple la propiedad de que el vector $\boldsymbol{C(n,\dot{\eta})\dot{\eta}}$ es único. Además es fácil verificar que $\boldsymbol{\dot{M}(\eta)} - 2\boldsymbol{C(n,\dot{\eta})}$ es una matriz antisimétrica.

Dado que la estructura de la matriz definida por (36) es más sencilla que la matriz definida por (39), la matriz (36) es la que utiliza en este trabajo para definir el modelo de rotación de la aeronave.

3. Reducciones y simplificaciones al modelo completo

Además de que el modelo matemático permite simular el comportamiento de un sistema, es también importante conocerlo porque a partir de él se pueden estimar los estados, filtrar señales o diseñar un sistema de control. En este sentido se observa que la dinámica de rotación completa del quadrotor es compleja, lo que hace difícil diseñar un controlador que posteriormente pueda ser implementado en un sistema digital, por lo que es útil buscar una alternativa a este modelo, tal que sea más sencilla en estructura, pero que defina de forma adecuada el comportamiento dinámico real, es por eso que en esta sección, se presentan algunas aproximaciones. Primeramente, se aborda una clásica linealización aproximada, luego se presenta una aproximación del modelo completo mediante un vuelo cuasi–estático, que permite representarlo como un modelo no lineal reducido, tal como los presentados en [14],[15],[16],[17], donde se modela mediante Newton-Euler y se considera un marco de referencia definido en centro de la aeronave. Posteriormente se presenta una simplificación mediante pequeño ángulo, y por último se presenta un modelo que se basa en aproximar una nueva matriz de Coriolis.

3.1 Linealización aproximada (modelo lineal)

Para linealizar el sistema, se expresa el modelo de rotación, en variables de estado, así mismo se considera un punto de equilibrio; por lo tanto, la dinámica de rotación en variables de estado a partir de (32) es:

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{M(\eta)^{-1}\tau} - \boldsymbol{M(\eta)^{-1}C(n,\dot{\eta})\dot{\eta}} \tag{40}$$

$$\begin{pmatrix}\dot{\boldsymbol{\eta}}\\ \ddot{\boldsymbol{\eta}}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\dot{\boldsymbol{\eta}}\\ -\boldsymbol{M(\eta)^{-1}C(n,\dot{\eta})\dot{\eta}} + \boldsymbol{M(\eta)^{-1}\tau}\end{pmatrix} \tag{41}$$

El vector de estado y el vector de entrada en equilibrio corresponden a:

$$\bar{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix}\bar{\boldsymbol{\eta}}\\ \dot{\bar{\boldsymbol{\eta}}}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix} \tag{42}$$

$$\bar{\mathbf{u}} = (\boldsymbol{\tau}) = (0) \tag{43}$$

La expansión en series de Taylor de una función alrededor de un punto de equilibrio $\bar{x}, \bar{u}$ es:

$$\begin{aligned} f(x,u) = f(\bar{x},\bar{u}) &+ \frac{\partial f(\bar{x},\bar{u})}{\partial x}(x-\bar{x}) + \frac{\partial f(\bar{x},\bar{u})}{\partial u}(u-\bar{u}) + (x-\bar{x})^T\frac{\partial^2 f(\bar{x},\bar{u})}{\partial^2 x}(x-\bar{x}) \\ &+ (u-\bar{u})^T\frac{\partial^2 f(\bar{x},\bar{u})}{\partial^2 u}(u-\bar{u}) + T.O.S. \end{aligned} \tag{44}$$

Donde T.O.S son los términos de orden superior de la serie, tomando los primeros términos de la serie se obtiene:

$$f(x,u) = \frac{\partial f(\bar{x},\bar{u})}{\partial x}(x-\bar{x}) + \frac{\partial f(\bar{x},\bar{u})}{\partial u}(u-\bar{u}) \tag{45}$$

Definiendo los estados incrementales y las entradas incrementales:

$$\mathbf{x}_{\boldsymbol{\delta}} = (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})$$
$$\mathbf{u}_{\boldsymbol{\delta}} = (\mathbf{u} - \bar{\mathbf{u}}) \quad (46)$$

Entonces el sistema linealizado alrededor de un punto de equilibrio adquiere la forma:

$$\dot{\mathbf{x}}_{\boldsymbol{\delta}} = \mathbf{A}\mathbf{x}_{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{\boldsymbol{\delta}} \quad (47)$$

Donde:

$$\boldsymbol{A} = \frac{\partial \boldsymbol{f}(\bar{\boldsymbol{x}}, \bar{\boldsymbol{u}})}{\partial \boldsymbol{x}} = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x}} \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u})|_{(\bar{x},\bar{u})}$$
$$\boldsymbol{B} = \frac{\partial \boldsymbol{f}(\bar{\boldsymbol{x}}, \bar{\boldsymbol{u}})}{\partial \boldsymbol{u}} = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{u}} \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u})|_{(\bar{x},\bar{u})}$$

$$\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\eta}}(\dot{\boldsymbol{\eta}})\Big|_{(\bar{x},\bar{u})} = 0$$
$$\frac{\partial f}{\partial \dot{\boldsymbol{\eta}}}(\dot{\boldsymbol{\eta}})\Big|_{(\bar{x},\bar{u})} = \boldsymbol{I}$$
$$\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\eta}}(-\boldsymbol{M_b}(\boldsymbol{\eta})^{-1}\boldsymbol{C}(\boldsymbol{n}, \dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}} + \boldsymbol{M_b}(\boldsymbol{\eta})^{-1}\boldsymbol{\tau})|_{(\bar{x},\bar{u})} = 0$$
$$\frac{\partial f}{\partial \dot{\boldsymbol{\eta}}}(-\boldsymbol{M_b}(\boldsymbol{\eta})^{-1}\boldsymbol{C}(\boldsymbol{n}, \dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}} + \boldsymbol{M_b}(\boldsymbol{\eta})^{-1}\boldsymbol{\tau})|_{(\bar{x},\bar{u})} = 0$$
$$\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\tau}}(\dot{\boldsymbol{\eta}})|_{(\bar{x},\bar{u})} = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\tau}}(-\boldsymbol{M_b}(\boldsymbol{\eta})^{-1}\boldsymbol{C}(\boldsymbol{n}, \dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}} + \boldsymbol{M_b}(\boldsymbol{\eta})^{-1}\boldsymbol{\tau})|_{(\bar{x},\bar{u})} = \begin{pmatrix} \frac{1}{I_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_z} \end{pmatrix}$$

Además $\boldsymbol{M_b}$ es:

$$\boldsymbol{M_b} = \begin{pmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{pmatrix} \quad (48)$$

Por lo tanto, el sistema linealizado es:

$$\begin{pmatrix} \dot{\boldsymbol{\eta}} \\ \ddot{\boldsymbol{\eta}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \boldsymbol{I} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\eta} \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \boldsymbol{M_b}(\boldsymbol{\eta})^{-1} \end{pmatrix} (\boldsymbol{\tau}) \quad (49)$$

Reacomodando y reemplazando la inversa de la nueva matriz de Inercias (48), se obtiene el modelo lineal que describe la rotación del sistema (modelo lineal):

$$\begin{pmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{I_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{pmatrix} \quad (50)$$

3.2 Modelo no lineal reducido (modelo Bouabdallah)

Otra aproximación interesante de la dinámica de rotación que aparece en la literatura es desarrollar el modelo mediante Newton-Euler y considerar un marco de referencia móvil en el centro de la aeronave desde donde se definen los movimientos y velocidades del quadrotor, es decir el marco de referencia {c} definido en la figura 1. Entonces desde el marco de referencia {a}, se puede considerar un vuelo cuasi-estacionario de la aeronave, por lo que se puede aproximar el vector de velocidades angulares $\boldsymbol{\Omega} \approx \dot{\boldsymbol{\eta}}$ [14], es decir, directamente son simplificadas las matrices de masa y la matriz de Coriolis del modelo completo mediante:

$$\psi \approx \theta \approx \phi \approx 0 \tag{51}$$

$$\cos\phi = \cos\theta = \cos\psi = 1; \sin\phi = \sin\theta = \sin\psi = 0 \tag{52}$$

Al aplicar estas igualdades a la matriz de inercias (33) y de Coriolis (36) se obtiene:

$$\boldsymbol{M_c}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{pmatrix} \tag{53}$$

$$\begin{pmatrix} c_{c11} & c_{c12} & c_{c13} \\ c_{c21} & c_{c22} & c_{c23} \\ c_{c31} & c_{c32} & c_{c33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \dot{\psi}(I_z - I_y - I_x) & 0 \\ \dot{\psi}(I_y + I_x - I_z) & 0 & 0 \\ -I_x\dot{\theta} & (I_y - I_z)\dot{\phi} & 0 \end{pmatrix} \tag{54}$$

Reemplazando (53) y (54) en (32) y reacomodando, se obtiene el modelo reducido no lineal para la dinámica de rotación, el cual es equivalente a los modelos que se obtienen mediante Newton-Euler, por ejemplo; el modelo presentado por **Bouabdallah** [14]:

$$\begin{pmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} \frac{1}{I_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & \dot{\psi}(I_z - I_y - I_x) & 0 \\ \dot{\psi}(I_y + I_x - I_z) & 0 & 0 \\ -I_x\dot{\theta} & (I_y - I_z)\dot{\phi} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{I_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{pmatrix} \tag{55}$$

3.3 Reducción del modelo mediante pequeño ángulo (modelo propuesto 1)

Cuando se simplifica el modelo mediante linealización aproximada o al considerar condiciones estacionarias se tiene la desventaja de que el modelo solo es válido para pequeñas desviaciones alrededor de este punto de operación, por ejemplo, si consideramos $sin\theta = 0$, al desviarse la posición a un valor pequeño, sea el ejemplo; $\theta = 0.1rad$, el error porcentual respecto al valor real es del 100% y de 0.5 % para el $cos\theta = 1$ de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$error\ \% = \frac{|valor\ aproximado - valor\ real|}{|valor\ real|}(100\ \%) \tag{56}$$

Para el caso del $sin\theta = 0$

$$error\ \% = \frac{|0 - \sin(0.1)|}{|\sin(0.1)|}(100\ \%) = 100\ \% \tag{57}$$

Para el $cos\theta = 1$

$$error\ \% = \frac{|0 - \cos(0.1)|}{|\cos(0.1)|}(100\ \%) = 0.5\% \tag{58}$$

Ahora si se representa el $sin\theta$ y el $cos\theta$ en una serie de Taylor que considera los términos cuadráticos, alrededor del punto de operación de interés se obtiene:

$$f(x) = f(\bar{x}) + \frac{d}{dx}\frac{f(\bar{x})}{1!}(x-\bar{x}) + \frac{d^2}{d^2x}\frac{f(\bar{x})}{2!}(x-\bar{x})^2 + T.O.S. \quad (59)$$

Entonces para el $sin\theta$, $cos\theta$, $sin^2\theta$, $cos^2\theta$, alrededor del valor de operación $\theta = 0$ se obtiene:

$$\sin\theta = \sin(0) + \frac{\cos(0)}{1}(\theta) - \frac{\sin(0)}{2}(\theta)^2 = \theta$$

$$\cos\theta = \cos(0) + \frac{\sin(0)}{1}(\theta) - \frac{\cos(0)}{2}(\theta)^2 = 1 - \frac{\theta^2}{2}$$

$$\sin^2\theta = \sin^2(0) + \frac{2\sin(0)\cos(0)}{1}(\theta) + \left(\frac{-2\sin(0)\sin(0) + 2\cos(0)\cos(0)}{2}\right)(\theta)^2 = \theta^2$$

$$\cos^2\theta = \cos^2(0) - \frac{2\cos(0)\sin(0)}{1}(\theta) - \left(\frac{2\cos(0)\sin(0) - 2\sin(0)\sin(0)}{2}\right)(\theta)^2 = 1 - \theta^2 \quad (60)$$

Al obtener el error porcentual de cada una de estas expresiones, para distintas desviaciones obtenemos los valores de la tabla 1 mientras que en el caso del $sin^2\theta\ y\ cos^2\theta$ tenemos la tabla 2.

Tabla 1. Valores del error porcentual del $sin\theta,\ cos\theta$ para diferentes aproximaciones

$\theta(rad)$	Valor Real $sin\ \theta$	e% $sin\ \theta = 0$	e% $sin\ \theta = \theta$	Valor Real $cos\ \theta$	e% $cos\ \theta = 1$	e% $cos\theta = 1 - \frac{\theta^2}{2}$
0.1	0.0998	100%	0.166%	0.9950	0.502%	0.0004%
0.2	0.1986	100%	0.669%	0.9800	2.033%	0.0067%
0.3	0.2955	100%	1.515%	0.9553	4.675%	0.0352%
0.4	0.3894	100%	2.717%	0.9210	8.570%	0.1151%
0.5	0.4794	100%	4.291%	0.8775	13.94%	0.294%

Tabla 2. Valores del error porcentual del $sin^2\theta\ y\ cos^2\theta$ para diferentes aproximaciones

$\theta(rad)$	Valor Real $sin^2\ \theta$	e% $sin^2\ \theta = 0$	e% $sin^2\ \theta = \theta^2$	Valor Real $cos^2\ \theta$	e% $cos^2\ \theta = 1$	e% $cos^2\theta = 1 - \theta^2$
0.1	0.0099	100%	0.334%	0.990	1.010%	0.003%
0.2	0.0394	100%	1.30%	0.960	4.166%	0.05%
0.3	0.0873	100%	3.05%	0.912	9.649%	0.219%
0.4	0.1516	100%	5.50%	0.848	17.924%	0.943%
0.5	0.2298	100%	8.767%	0.770	29.870%	2.597%

Con el fin de minimizar el error de las aproximaciones, así como de simplificar las matrices correspondientes se elige:

$$\begin{matrix}\sin\theta = \theta, \cos\theta = 1, \sin^2\theta = \theta^2, \cos^2\theta = 1-\theta^2 \\ \sin\phi = \phi, \cos\phi = 1, \sin^2\phi = \phi^2, \cos^2\phi = 1-\phi^2\end{matrix} \quad (61)$$

Ahora con estas expresiones se simplifica la matriz de Inercias (33) y la matriz de Coriolis (36) y se obtiene:

$$\boldsymbol{M_d(\eta)} = \begin{pmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & -\phi\\ -\theta & \phi & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}I_x & 0 & 0\\ 0 & I_y & 0\\ 0 & 0 & I_z\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & 0 & -\theta\\ 0 & 1 & \phi\\ 0 & -\phi & 1\end{pmatrix} \quad (62)$$

$$\boldsymbol{M_d(\eta)} = \begin{pmatrix}I_x & 0 & -\theta I_x\\ 0 & I_z\phi^2 + I_y & \phi I_y - \phi I_z\\ -\theta I_x & \phi I_y - \phi I_z & I_x\theta^2 + I_y\phi^2 + I_z\end{pmatrix} \quad (63)$$

$$\boldsymbol{M_d(\eta)^{-1}} = \left(\frac{1}{I_xI_yI_z(\phi^2+1)^2}\right)* \begin{pmatrix}I_xI_z\theta^2\phi^2 + I_xI_y\theta^2 + I_yI_z\phi^4 + 2I_yI_z\phi^2 + I_yI_z & \theta\phi I_xI_z - \theta\phi I_xI_y & \theta I_xI_z\phi^2 + \theta I_xI_y\\ \theta\phi I_xI_z - \theta\phi I_xI_y & I_xI_y\phi^2 + I_xI_z & \phi I_xI_z - \phi I_xI_y\\ \theta I_xI_z\phi^2 + \theta I_xI_y & \phi I_xI_z - \phi I_xI_y & I_xI_z\phi^2 + I_xI_y\end{pmatrix} \quad (64)$$

$$\boldsymbol{C_d(n,\dot\eta)} = \begin{pmatrix}c_{d11} & c_{d12} & c_{d13}\\ c_{d21} & c_{d22} & c_{d23}\\ c_{d31} & c_{d32} & c_{d33}\end{pmatrix} \quad (65)$$

$$\begin{cases}c_{d11} = 0\\ c_{d12} = (I_y - I_z)(\dot\theta\phi + \dot\psi\phi^2) + (I_Z - I_y)\dot\psi(1-\phi^2) - I_x\dot\psi\\ c_{d13} = (I_Z - I_y)\dot\psi\phi(1-\theta^2)\\ c_{d21} = (I_z - I_y)(\dot\theta\phi + \dot\psi\phi^2) + (I_y - I_z)\dot\psi(1-\phi^2) + I_x\dot\psi\\ c_{d22} = (I_z - I_y)\dot\phi\phi\\ c_{d23} = (-I_x + I_y\phi^2)\dot\psi\theta + I_z\dot\psi(1-\phi^2)\theta\\ c_{d31} = (I_y - I_z)(\dot\psi(1-\theta^2)\phi) - I_x\dot\theta\\ c_{d32} = (I_Z - I_y)(\dot\theta\phi\theta + \dot\phi\phi^2) + (I_y - I_z)\dot\phi(1-\phi^2) + (I_x - I_y\phi^2)\dot\psi\theta - I_z\dot\psi(1-\phi^2)\theta\\ c_{d33} = (I_y - I_z)\dot\phi\phi(1-\theta^2) - I_y\dot\theta\phi^2\theta - I_Z\dot\theta(1-\phi^2)\theta + I_x\dot\theta\theta\end{cases}$$

Por lo tanto, sustituyendo (63), (64) y (65) en (32) se obtiene (**modelo propuesto 1**)

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{M_d(\eta)^{-1}\tau} - \boldsymbol{M_d(\eta)^{-1}C_d(n,\dot\eta)\dot\eta} \quad (66)$$

3.4 Reducción del modelo mediante nueva aproximación de la matriz de Coriolis (modelo propuesto2)

Otra propuesta para reducir el modelo consiste en simplificar la matriz de Inercias mediante la aproximación de pequeño ángulo descrito en el apartado anterior, y posteriormente hallar una nueva matriz de Coriolis mediante los símbolos de Christoffel, es decir:

La matriz simplificada mediante (61), es:

$$\boldsymbol{M_e(\eta)} = \begin{pmatrix} I_x & 0 & -\theta I_x \\ 0 & I_y(1-\phi^2) + I_z\phi^2 & \phi I_y - \phi I_z \\ -\theta I_x & \phi I_y - \phi I_z & (1-\theta^2)\big(I_z(1-\phi^2) + I_y\phi^2\big) + I_x\theta^2 \end{pmatrix} \quad (67)$$

Y la matriz de inercias inversa es:

$$\boldsymbol{M_e(\eta)^{-1}} = \left(\frac{1}{I_x I_y I_z(\phi^2+1)^2}\right) * \begin{pmatrix} I_x I_z\theta^2\phi^2 + I_x I_y\theta^2 + I_y I_z\phi^4 + 2I_y I_z\phi^2 + I_y I_z & \theta\phi I_x I_z - \theta\phi I_x I_y & \theta I_x I_z\phi^2 + \theta I_x I_y \\ \theta\phi I_x I_z - \theta\phi I_x I_y & I_x I_y\phi^2 + I_x I_z & \phi I_x I_y - \phi I_x I_y \\ \theta I_x I_z\phi^2 - \theta I_x I_y & \phi I_x I_z - \phi I_x I_y & I_x I_z\phi^2 + I_x I_y \end{pmatrix} \quad (68)$$

Ahora hallando la matriz de Coriolis mediante los símbolos de Christoffel a partir de (67) queda:

$$\boldsymbol{C_e(n,\dot{\eta})} = \begin{pmatrix} c_{e11} & c_{e12} & c_{e13} \\ c_{e21} & c_{e22} & c_{e23} \\ c_{e31} & c_{e32} & c_{e33} \end{pmatrix} \quad (69)$$

$$\begin{cases} c_{e11} = 0 \\ c_{e12} = \frac{1}{2}\big[(2I_y\phi - 2I_z\phi)\dot{\theta} + (-I_x - I_y + I_z)\dot{\psi}\big] \\ c_{e13} = \frac{1}{2}\big[(-I_x - I_y + I_z)\dot{\theta} + (-2I_y\phi + 2I_z\phi + 2I_y\theta^2\phi - 2I_z\theta^2\phi)\dot{\psi}\big] \\ c_{e21} = \frac{1}{2}\big[(-2\mathrm{I_y}\phi + 2I_z\phi)\dot{\theta} + (\mathrm{I_y} - \mathrm{I_z} + \mathrm{I_x})\dot{\psi}\big] \\ c_{e22} = \frac{1}{2}\big[(-2\mathrm{I_y}\phi + 2I_z\phi)\dot{\phi}\big] \\ c_{e23} = \frac{1}{2}\big[(I_y - I_z + I_x)\dot{\phi} + (-2\theta I_x + 2\theta I_z + 2\theta\phi^2 I_y - 2\theta\phi^2 I_z)\dot{\psi}\big] \\ c_{e31} = \frac{1}{2}\big[(-I_x + I_y - I_z)\dot{\theta} + (2\mathrm{I_y}\phi - 2I_z\phi - 2I_y\theta^2\phi + 2I_z\theta^2\phi)\dot{\psi}\big] \\ c_{e32} = \frac{1}{2}\big[(I_y - I_z - I_x)\dot{\phi} + (2\mathrm{I_x}\theta - 2I_z\theta - 2I_y\phi^2\theta + 2\theta\phi^2 I_z)\dot{\psi}\big] \\ c_{e33} = \frac{1}{2}\big[(2I_y\phi - 2I_z\phi - 2I_y\theta^2\phi + 2I_z\theta^2\phi)\dot{\phi} + (2\theta I_x - 2\theta I_z - 2\theta\phi^2 I_y + 2\theta\phi^2 I_z)\dot{\theta}\big] \end{cases}$$

Ahora sustituyendo (67), (68) y (69) en (32) se obtiene (**modelo propuesto 2**):

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{M_e(\eta)^{-1}\tau} - \boldsymbol{M_e(\eta)^{-1}C_e(n,\dot{\eta})\dot{\eta}} \quad (70)$$

4. Propuesta de control

Con el fin de observar el comportamiento en lazo cerrado de cada uno de los modelos que definen la rotación del sistema, se propone un sistema de control, basado en cada modelo, tal que se elimine la dinámica de rotación de dicho modelo y se asigne una nueva dinámica estable común para todos los modelos, posteriormente cada sistema de control será simulado en lazo cerrado en el modelo no lineal completo de la aeronave. Es decir, se propone un control del tipo [27]:

$$\boldsymbol{\tau = M(\eta)(-K_a\dot{\eta}_\delta - K_b\eta_\delta) + C(n,\dot{\eta})\dot{\eta}} \quad (71)$$

Ahora introduciendo el control en (32) y simplificando se obtiene (74):

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{-M(\eta)^{-1}C(n,\dot{\eta})\dot{\eta} + M(\eta)^{-1}\tau} \quad (72)$$

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}} = -\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\eta})^{-1}\boldsymbol{C}(\boldsymbol{n},\dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}} + \boldsymbol{M}(\boldsymbol{\eta})^{-1}[\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\eta})(-\boldsymbol{K_a}\dot{\boldsymbol{\eta}}_{\boldsymbol{\delta}} - \boldsymbol{K_b}\boldsymbol{\eta}_{\boldsymbol{\delta}}) + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{n},\dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}}] \quad (73)$$

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}} = -\boldsymbol{K_a}\dot{\boldsymbol{\eta}}_{\boldsymbol{\delta}} - \boldsymbol{K_b}\boldsymbol{\eta}_{\boldsymbol{\delta}} \quad (74)$$

Definiendo

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_{\boldsymbol{\delta}} = \dot{\boldsymbol{\eta}} - \dot{\overline{\boldsymbol{\eta}}}\ ;\ \boldsymbol{\eta}_{\boldsymbol{\delta}} = \boldsymbol{\eta} - \overline{\boldsymbol{\eta}} \quad (75)$$

$$\boldsymbol{K_a} = \begin{pmatrix} k_2 & 0 & 0 \\ 0 & k_4 & 0 \\ 0 & 0 & k_6 \end{pmatrix}, \boldsymbol{k_b} = \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_3 & 0 \\ 0 & 0 & k_5 \end{pmatrix} \quad (76)$$

Por lo tanto, sustituyendo (75), (76) en (74) se tiene

$$\begin{pmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} k_2 & 0 & 0 \\ 0 & k_4 & 0 \\ 0 & 0 & k_6 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \dot{\phi}_\delta \\ \dot{\theta}_\delta \\ \dot{\psi}_\delta \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_3 & 0 \\ 0 & 0 & k_5 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \phi_\delta \\ \theta_\delta \\ \psi_\delta \end{pmatrix} \quad (77)$$

La cual es una dinámica común para todos los sistemas que se obtiene de compensar la dinámica de cada modelo reducido.

$$\begin{pmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -k_1(\phi - \bar{\phi}) - k_2(\dot{\phi} - \dot{\bar{\phi}}) \\ -k_3(\theta - \bar{\theta}) - k_2(\dot{\theta} - \dot{\bar{\theta}}) \\ -k_5(\psi - \bar{\psi}) - k_6(\dot{\psi} - \dot{\bar{\psi}}) \end{pmatrix} \quad (78)$$

Como la estabilidad en lazo cerrado está dada por el polinomio característico de 78, si se eligen valores definidos positivos para $\boldsymbol{K_a}\ y\ \boldsymbol{K_b}$; el sistema es estable.

4.1 Control para el sistema lineal

Ahora el sistema de control para el sistema lineal diseñado mediante (71), está dado por:

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{M_b}(\boldsymbol{\eta})(-\boldsymbol{K_a}\dot{\boldsymbol{\eta}}_{\boldsymbol{\delta}} - \boldsymbol{K_b}\boldsymbol{\eta}_{\boldsymbol{\delta}}) \quad (79)$$

$$\begin{pmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{pmatrix}\left[-\begin{pmatrix} k_2 & 0 & 0 \\ 0 & k_4 & 0 \\ 0 & 0 & k_6 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \dot{\phi}_\delta \\ \dot{\theta}_\delta \\ \dot{\psi}_\delta \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_3 & 0 \\ 0 & 0 & k_5 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \phi_\delta \\ \theta_\delta \\ \psi_\delta \end{pmatrix}\right] \quad (80)$$

4.2 Control para el sistema reducido

A su vez el sistema de control para el sistema reducido es:

$$\begin{pmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{pmatrix}\left[-\begin{pmatrix} k_2 & 0 & 0 \\ 0 & k_4 & 0 \\ 0 & 0 & k_6 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \dot{\phi}_\delta \\ \dot{\theta}_\delta \\ \dot{\psi}_\delta \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_3 & 0 \\ 0 & 0 & k_5 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \phi_\delta \\ \theta_\delta \\ \psi_\delta \end{pmatrix}\right] + \begin{pmatrix} 0 & \dot{\psi}(I_z - I_y - I_x) & 0 \\ \dot{\psi}(I_y + I_x - I_z) & 0 & 0 \\ -I_x\dot{\theta} & (I_y - I_z)\dot{\phi} & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \quad (81)$$

4.3 Control para el sistema propuesto 1

Por otro lado, el control para el sistema propuesto 1, mediante las ecuaciones (63) y (65) es:

$$\boldsymbol{\tau = M_d(\eta)(-K_a\dot{\eta}_\delta - K_b\eta_\delta) + C_d(n,\dot{\eta})\dot{\eta}} \quad (82)$$

4.4 Control para el sistema propuesto 2

Por último, el controlador para el sistema propuesto 2 se obtiene con las ecuaciones (67) y (69); por lo que el controlador toma la forma:

$$\boldsymbol{\tau = M_e(\eta)(-K_a\dot{\eta}_\delta - K_b\eta_\delta) + C_e(n,\dot{\eta})\dot{\eta}} \quad (83)$$

4.5 Control de altura de la aeronave

El control propuesto para estabilizar la elevación del quadrotor se propone igual a los casos anteriores, es decir se propone un control que compense la dinámica del sistema y asigne una dinámica estable; se tiene de (22), la ecuación que describe la dinámica de la elevación:

$$\ddot{z} = -g + (\cos\theta\cos\phi)\frac{F_e}{m} \quad (84)$$

Se propone el control:

$$F_e = [-k_7(z-\bar{z}) - k_8(\dot{z}-\dot{\bar{z}}) + g]\frac{m}{\cos\theta\cos\phi} \quad (85)$$

Donde la estabilidad en lazo cerrado depende de asignar constantes positivas para $k_7\ y\ k_8$.

Las ecuaciones que definen la relación entre la fuerza de empuje total, los torques y las fuerzas de empuje de cada motor están dadas por las ecuaciones (6), (11), (12), (13) y (15).

Por lo que las fuerzas de empuje en función de las entradas de control son:

$$\begin{pmatrix} F_{e1} \\ F_{e2} \\ F_{e3} \\ F_{e4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{4k_r} & \frac{1}{4} \\ 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{4k_r} & \frac{1}{4} \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{4k_r} & \frac{1}{4} \\ 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{4k_r} & \frac{1}{4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \\ F_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}\tau_\phi + \frac{1}{4k_r}\tau_\psi + \frac{1}{4}F_T \\ \frac{1}{2}\tau_\theta - \frac{1}{4k_r}\tau_\psi + \frac{1}{4}F_T \\ \frac{1}{4k_r}\tau_\psi + \frac{1}{2}\tau_\phi + \frac{1}{4}F_T \\ \frac{1}{4}F_T - \frac{1}{4k_r}\tau_\psi - \frac{1}{2}\tau_\theta \end{pmatrix} \quad (86)$$

5. Simulación

En esta sección se presentan las simulaciones numéricas en lazo abierto y lazo cerrado de los diferentes modelos, dicha simulación se llevó a cabo mediante el software de MatLab en el entorno de Simulink, el método numérico utilizado corresponde a Runge-Kutta de cuarto orden a un paso de simulación de 0.001s.

Para el caso de las simulaciones en lazo abierto, las condiciones iniciales se establecen como: $(x,y,z) = (0,0,0)m$, $(\dot{x},\dot{y},\dot{z}) = (0,0,0)m/s$, $(\phi,\theta,\psi) = (0.2,0.2,0.2)rad$ y $(\dot{\phi},\dot{\theta},\dot{\psi}) = (0,0,0)rad/s$, además se proponen como constantes los siguientes torques; $(\tau_\phi,\tau_\theta,\tau_\psi) = (0.002,0,1)Nm$, por otro lado, los parámetros que definen los modelos de la aeronave, se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros del modelo.

Parámetro	Valor	Unidad
l	0.2	m
m	0.930	Kg
g	9.81	m/s^2
I_x	$15x10^{-3}$	$Kg\ m^2$
I_y	$15x10^{-3}$	$Kg\ m^2$
I_z	$30x10^{-3}$	$Kg\ m^2$

Para el sistema en lazo abierto, la dinámica de traslación hace uso del sistema de ecuaciones no lineal definido por (22) y este es común para todos los modelos, pero, se hace uso de las posiciones angulares obtenidas de cada modelo de rotación simplificado. La rotación para el modelo completo, se define por (32), (33) y (36), en el caso del modelo propuesto 1, la dinámica de rotación corresponde a las ecuaciones (63), (64), (65) y (66), a su vez el modelo de rotación propuesto 2, es simulado por (67), (68), (69) y (70), para el modelo de rotación equivalente al modelo de Bouadallah [14], se simula por las ecuaciones (53), (54) y (55) y por último para el modelo de rotación lineal, la simulación se lleva a cabo con las ecuaciones (48), (49) y (50).

Las figuras 4, 5, y 6 corresponden a la comparación de los modelos dinámicos de rotación del quadrotor mientras que las figuras 7, 8 y 9 corresponden a la comparación de la dinámica de traslación.

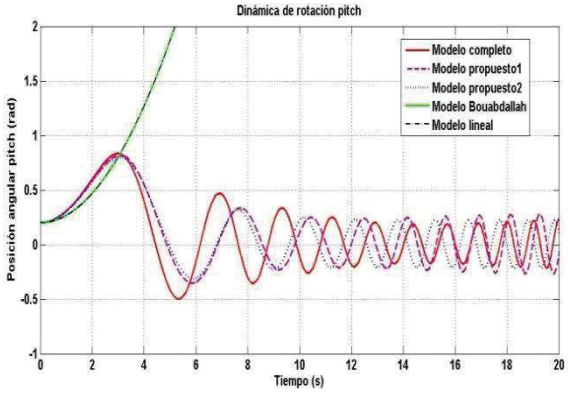


Figura 4. Comparativa de los diferentes modelos de rotación para el movimiento de pitch.

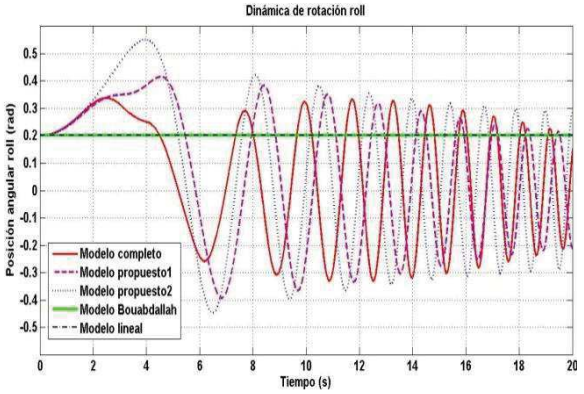


Figura 5. Comparativa de los diferentes modelos de rotación para el movimiento de roll.

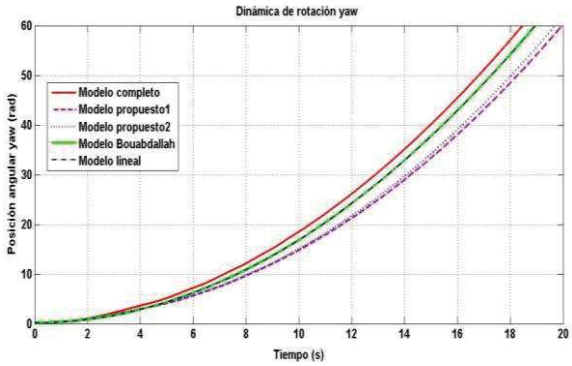


Figura 6. Comparativa de los diferentes modelos dinámicos de rotación para el movimiento de yaw.

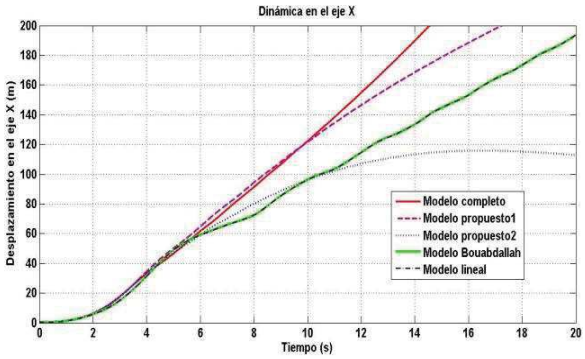


Figura 7. Comparativa de las diferentes respuestas para el desplazamiento en el eje X.

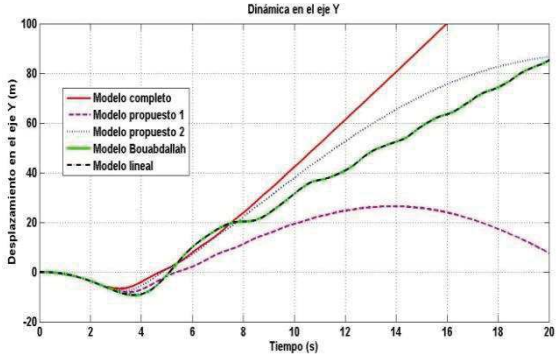


Figura 8. Comparativa de las diferentes respuestas para el desplazamiento en el eje Y.

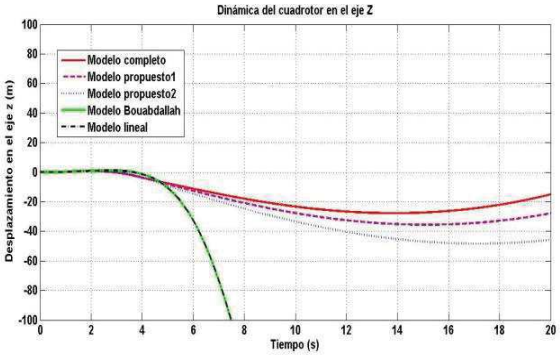


Figura 9. Comparativa de las diferentes respuestas para el desplazamiento en el eje Z

Como se observa en las figuras 4 a 9, el modelo lineal y el modelo reducido son similares en respuesta pero su comportamiento difiere al modelo completo, mientras que el comportamiento de los modelos aproximados propuestos en este trabajo, se asemejan más al modelo completo.

Por otro lado, para el caso de las simulaciones en lazo cerrado, las condiciones iniciales se establecen como: $(x, y, z) = (0,0,0)m$, $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}) = (0,0,0)m/s$, $(\phi, \theta, \psi) = (0.3, 0.3, 0.3)rad$ y $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}) = (0.5, 0.5, 0.5)\ rad/s$, de igual forma parámetros se muestran en la Tabla 3.

En la simulación en lazo cerrado, cada uno de los controladores obtenidos mediante los diferentes modelos aproximados, son aplicados a la dinámica no lineal de traslación y de rotación completa del sistema definido por las ecuaciones (22), (32), (34) y (36), con el fin de poder observar el comportamiento de los estados controlados y además se observa la utilidad y validez de cada modelo aproximado al diseñar un controlador. Entonces, el control, para la altura corresponde a la ecuación (85), el control diseñado a partir del modelo propuesto 1 es la ecuación (82), a su vez el control mediante el modelo propuesto 2 es simulado por (83), para el control mediante el modelo equivalente a Bouabdallah [14], se simula por la ecuación (81) y por último para el control diseñado por el modelo lineal, la simulación se lleva a cabo con la ecuación (80).

Las figuras 10, 11, y 12 corresponden a la comparación de los contralores para las posiciones angulares diseñados mediante los diversos modelos aproximados, y que son aplicados al sistema no lineal completo. Las figuras 13, 14 y 15 corresponden al control de altura y los desplazamientos para el eje “X” y el eje “Y” respectivamente, por último, la figura 16 muestra las evoluciones temporales de las fuerzas de empuje que produce cada motor-hélice, mediante los diferentes controladores.

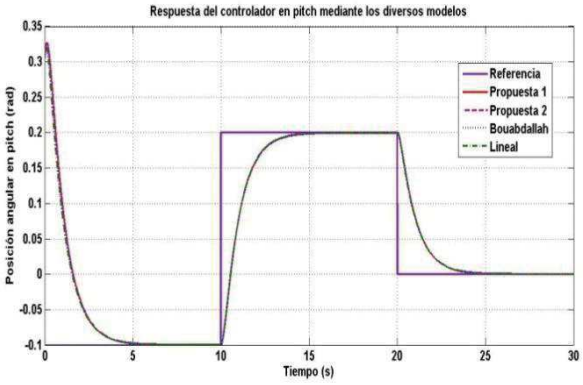


Figura 10. Comparativa de los controladores para el eje de rotación pitch, diseñados mediante los diferentes modelos.

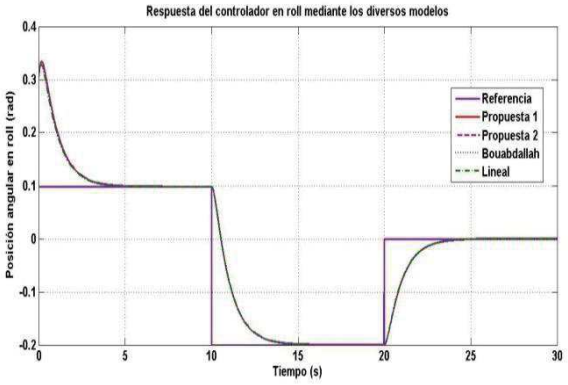


Figura 11. Comparativa de los controladores para el eje de rotación roll, diseñados mediante los diferentes modelos

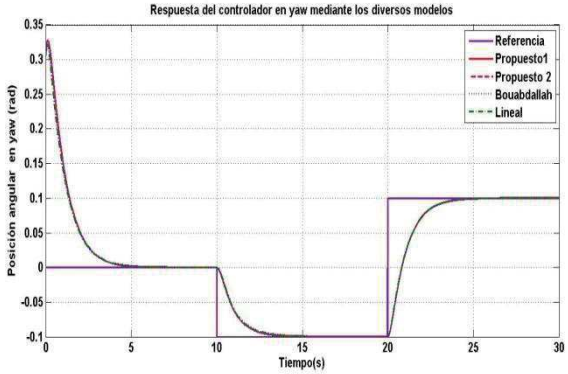


Figura 12. Comparativa de los controladores para el eje de rotación yaw, diseñados mediante los diferentes modelos

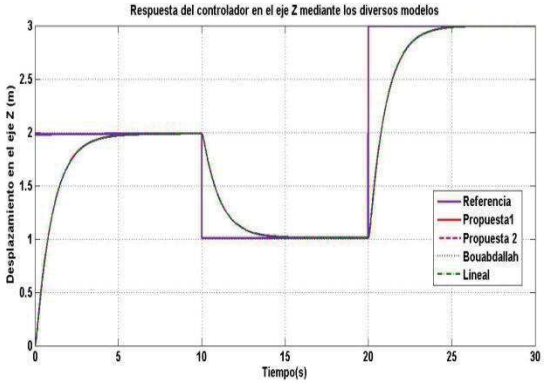


Figura 13. Comparativa de los controladores para la altura.

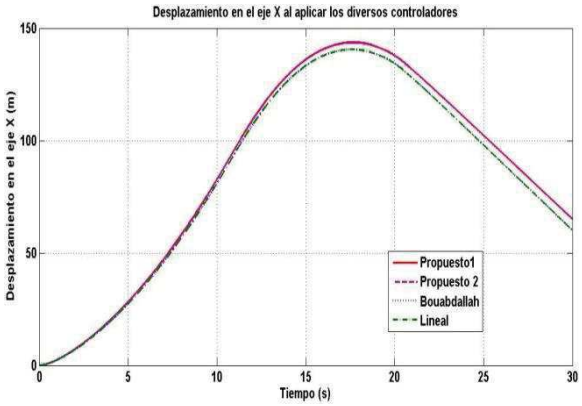


Figura 14. Comportamiento en el eje x para cada controlador aplicado al sistema no lineal

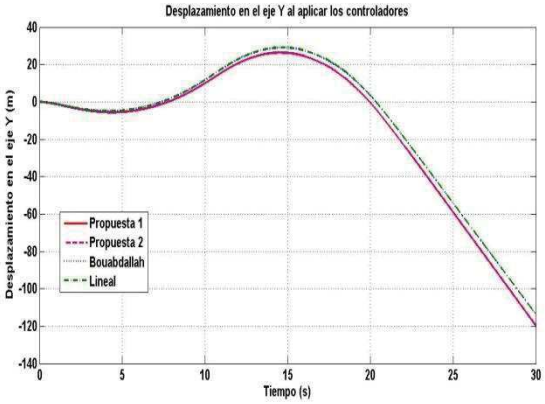


Figura 15. Comportamiento en el eje Y para cada controlador aplicado al sistema no lineal

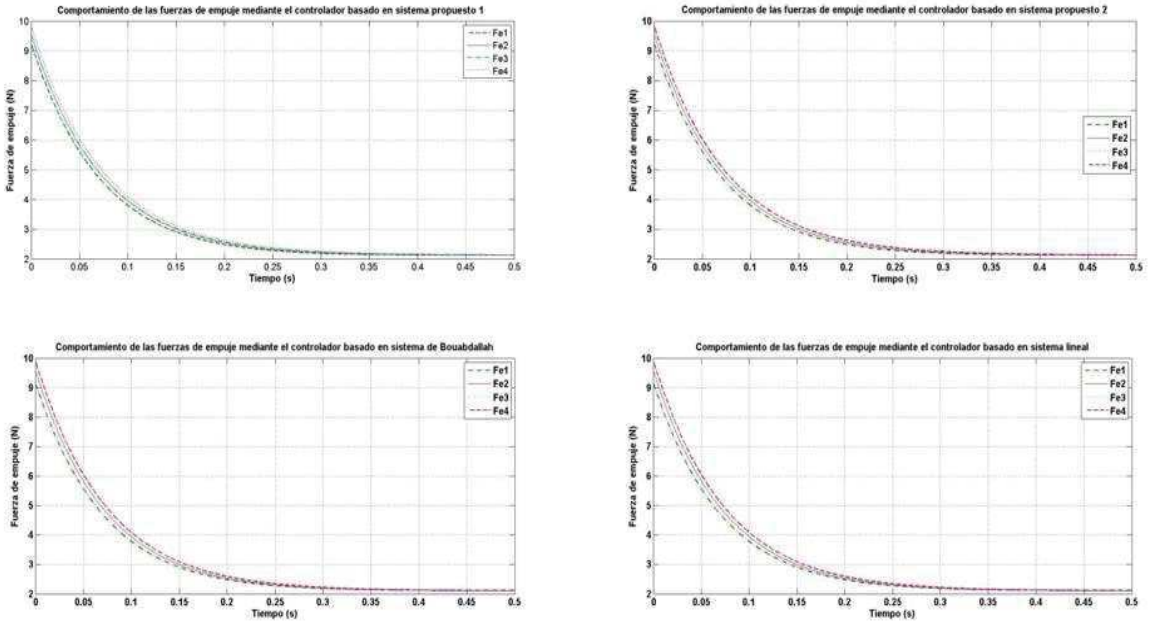


Figura 16. Evolución temporal de las fuerzas de empuje que produce cada motor-hélice, mediante los diferentes controladores

Como se observa en las figuras 10 a 13, las evoluciones del sistema completo, con los controladores diseñados a partir de los diferentes modelos, se encuentran sobrepuestas, es decir tienen la misma respuesta, en las figuras 14 y 15 se puede apreciar que el comportamiento para el desplazamiento en el eje “X” y el eje “Y” es similar, además, las entradas de control se aprecian en la figura 16 donde se observa el mismo comportamiento para los diferentes controladores.

6. Conclusiones

En este trabajo se presentó la metodología para modelar la dinámica de una aeronave tipo quadrotor mediante las ecuaciones de Euler- Lagrange, en la que se obtuvo la matriz de Coriolis mediante los símbolos de Christoffel y se comparó contra una matriz citada en la literatura, verificándose que son equivalentes. Luego se analizaron y compararon cuatro reducciones al modelo inicial, de lo cual se determinó que la dinámica de rotación más parecida al modelo no lineal completo, son las propuestas en este trabajo, sin embargo se observa que al desarrollar un controlador a partir de los diversos modelos aproximados, cualquiera cumple con el objetivo de estabilizar al sistema, lo cual se considera un buen resultado de este trabajo, porque, implica que se pueden diseñar e implementar diversos controladores a partir de un sistema lineal o de un sistema reducido, los cuales tienen una estructura simple, lo que facilita y reduce recursos computacionales a la hora de llevar a la práctica diversos controladores. Sin embargo, se propone corroborar estas simulaciones presentadas, mediante la parte experimental, con el fin de observar que pasa con las perturbaciones que no son consideradas, tal como; el ruido generado por vibración de los motores-hélices, el no conocer de forma precisa los parámetros o la dinámica no modelada, por ejemplo la del acoplamiento motor-hélice; por lo que un trabajo en desarrollo consiste en experimentar con los modelos presentados y sus respectivos controladores, así como de incluir la dinámica del acoplamiento motor-hélice en los diferentes modelos.

Referencias

[1] Floreano, Dario, and Robert J. Wood. *"Science, technology and the future of small autonomous drones." Nature* 521, no. 7553 (2015): 460.

[2] Gupta, Suraj G., Mangesh M. Ghonge, and P. M. Jawandhiya. *"Review of unmanned aircraft system (UAS)."* International journal of advanced research in computer engineering & technology (IJARCET) 2, no. 4 (2013): pp-1646.

[3] Cárdenas G., *"Drones Ciencia al Vuelo"*, ¿Cómo vez?, UNAM, México, 2015.

[4] Guardado R., Téllez M., Herrera A. *"El uso de drones en ciencias de la tierra.",* Reaxión, Vol.4, No. 2, pp.01-05, 2017.

[5] Sadr S., Moosavian S., Zarafshan P., "*Dynamics Modeling and Control of a Quadrotor with Swing Load"*, Hindawi Publishing Corporation, Journal of Robotics, Vol.20 No.14, pp. 01-12, 2014.

[6] Rodríguez R., Ipanaqué W., Carrera E., "*Comparación de modelos matemáticos y controladores PID vs LQR para un cuadricóptero",* Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, 2016.

[7] Balasubramanian E., Vasantharaj R., *"Dynamic Modeling and Control of Quadrotor",* International Journal of Engineering and Technology (IJET), Vol.5, No. 1, pp. 01-07, 2013.

[8] Nonami, K., Kendoul, F., Suzuki, S., Wang, W., & Nakazawa, D. (2010). “Introduction. In *Autonomous Flying Robots”* (pp. 1-29). Springer Japan.

[9] Beard, R. W., & McLain, T. W. (2012). “*Small unmanned aircraft: Theory and practice”*. Princeton university press.

[10] Castillo, Pedro, Rogelio Lozano, and Alejandro E. Dzul. “*Modelling and control of mini-flying machines”*. Physica-Verlag, 2006.

[11] P. Castillo P., García P., Lozano R., Albertos P., *"Modelado y estabilización de un helicóptero con cuatro rotores*", Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, CEA, Vol. 4 No. 1, pp. 41-57, 2007.

[12] Carrillo, Luis Rodolfo García, Alejandro Enrique Dzul López, Rogelio Lozano, and Claude Pégard. *"Quad rotorcraft control: vision-based hovering and navigation*". Springer Science & Business Media, 2012.

[13] Raffo, Guilherme Vianna. "Modelado y Control de un Helicóptero Quad-Rotor." *MS, disertación, Dept. telemática, automática y robótica, Univ. de Sevilla* (2007).

[14] Bouabdallah, Samir, and Roland Siegwart. *"Full control of a quadrotor."* 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Ieee, 2007.

[15] Falconi R., Melchiorri C., *"Dynamic Model and Control of an Over-actuated Quadrotor UAV",* 10th IFAC Symposium on Robot Control, International Federation of Automatic Control, pp. 01-06, Croatia, 2012.

[16] Elruby A., El-khatib M., El-Amary N., Hashad A. "*Dynamics Modeling and Control of Quadrotor Vehicle"*, 15th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering, Military Technical College Kobry, pp 01-12, Cairo, Egypt, 2012.

[17] Rubio J., Perez J., Zamudio Z., Salinas J., *"Comparison of Two Quadrotor Dynamic Models*", IEEE Latin America Transactions, Vol. 12, No. 4, pp. 531-537, 2014.

[18] Paiva E., Ipanaqué W., Carrera E. *"Modelado y control de un cuadricóptero*" Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, 2016.

[19] Bouabdallah S., Noth A., Siegwart R., *"PID vs LQ Control Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor",* IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 01-06 Sendal, Japan, 2004.

[20] Hossain R., Rideout D., Krouglicof N., "*Bond graph dynamic modeling and stabilization of a quadrotor helicopter", ResearchGate, 2010.*

[21] Patete A., Erazo A., *"Linear and nonlinear control for a micro unmanned aerial vehicle with quadrotor configuration",* Revista Ingeniería UC, Vol.23, No.3, pp. 247-259, 2016

[22] Agho C., Zhang R., *"Dynamic Model and Control of Quadrotor in the Presence of Uncertainties"*, University of South Carolina, 2017.

[23] Sabatomp F., *"Quadrotor control: modeling, nonlinear control design and simulation"*, KTH Electrical Engineering, 2015.

[24] Roldan Caballero A. *Modelado y monitoreo para un drone tipo cuadrirotor*. Tesis de Maestría en Ingeniería de Manufactura. Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México, México 2016.

[25] Sevilla Luis., Zamora J., Porras J., Fernández C. "*Modelado y control de un cuadricóptero",* Universidad Pontificia Comillas, 2014.

[26] Reyes Cortes, F. (2011). "*Robótica-Control de robots manipuladores"*. Alfaomega Grupo Editor.

[27] Sira-Ramírez, H. E. B. E. R. T. T., Marquez, R., Rivas-Echeverria, F., & Llanes-Santiago, O. (2005). *"Control de Sistemas no lineales". Automática & Robótica. Pearson Educación SA.*

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 32, pp.404 – 410, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Diseño de un Actuador Electromecánico Lineal Guiado

Edgar Daniel García Hernández[1], Ruíz Torres Maximiano F.[1]
y Sandoval Castro X. Yamile[2]

[1]CICATA-IPN, Unidad Querétaro. Instituto Politécnico Nacional. Cerro Blanco 141. Col. Colinas del Cimatario. Querétaro, Qro. C.P. 76090
[2] CONACYT-IPN, xysandoval@conacyt.mx .

Resumen.

Los actuadores electromecánicos lineales transforman el movimiento rotatorio de un motor a un movimiento lineal, estos tipos de actuadores son usados en la industria debido a la ventaja que presentan en relación a la velocidad máxima que pueden alcanzar. En este artículo se presenta el diseño de un actuador electromecánico lineal guiado, el cual debe de cumplir con parámetros de diseño presentados en este trabajo, así como las ventajas que brinda el implementar guías en su diseño. Se presenta el cálculo de las velocidades y de la carga máxima que este actuador puede alcanzar con los elementos que lo conforman. Con el desarrollo de este actuador se pretende fabricar una opción rentable que brinde movimiento lineal a maquinas utilizadas en la industria o para el uso de robots cartesianos, creando una opción que satisfaga las necesidades requeridas en la industria de la automatización.

Palabras clave: Actuador electromecánico, actuador lineal, movimiento lineal, correa dentada.

1. Introducción.

Los actuadores juegan un importante rol en los sistemas mecatrónicos industriales. Son los responsables de mover la carga a un punto requerido transformando una energía de entrada en una energía mecánica. Dependiendo del principio físico en el que esté basado la conversión de la energía se clasifican los diferentes tipos de actuadores, siendo los más usados en la industria los actuadores Electromagnéticos, electrostáticos, hidráulicos o neumáticos. En la figura podemos observar el uso de 2 diferentes tipos de actuadores para la automatización de un proceso [1].

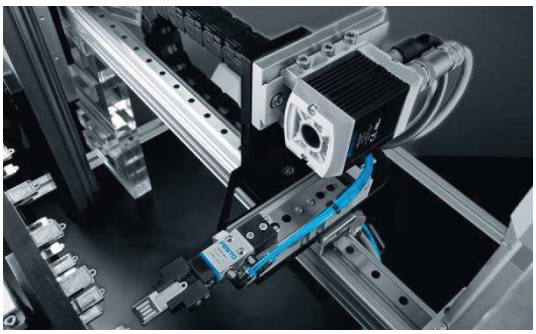


Figura 1. Combinación de actuadores (eléctricos y neumáticos) para la automatización de procesos.

Un actuador puede ser definido como un convertidor de energía que transforma la energía de una fuente externa en una energía mecánica de una forma controlada. Las cantidades de entrada del actuador dependen del tipo de energía utilizada y se pueden elegir entre todas las cantidades involucradas en la conversión de energía de la fuente de energía a las cantidades mecánicas de salida [2][3]. Dicho en otras palabras, dependiendo del tipo de energía en la entrada obtendremos una

salida proporcional a dicha entrada, para los actuadores electromagnéticos estas entradas pueden ser la corriente o el voltaje.

El presente trabajo hace uso de actuadores electromagnéticos (motores) para el diseño de un actuador electromecánico lineal guiado. Este tipo de actuadores son usados en la industria para dotar de movimiento a maquinas dedicadas a una tarea que presente movimientos lineales, en las imágenes se muestran 2 actuadores electromecánicos comerciales.

Figura 2. A) Eje lineal actuado por correa dentada (FESTO). B) Actuador lineal eléctrico (SMC).

Un actuador electromecánico lineal convierte el movimiento rotativo de un motor en un movimiento lineal en un plano, los actuadores usados comúnmente están formados por un motor eléctrico, la caja de engranajes y una correa dentada o un tornillo sin fin para transmitir el movimiento [4].

En el movimiento de tornillo, a medida que esta gira por la acción del motor o la caja de engranajes, la tuerca accionada se mueve a lo largo del tornillo sin fin, arrastrando la carga hacia delante o hacia atrás, según sea el sentido de giro del motor.

En el movimiento de correa dentada, a medida que la polea gira por acción del motor o por caja de engranajes, la banda dentada recorre cierta distancia entre dientes llamada paso, arrastrando hacia adelante o hacia atrás la carga.

Los actuadores electromecánicos lineales con correa dentada son usados para aplicaciones de alta velocidad, control de posición y carreras largas, presentando diferencias en la carga que son capaces de soportar [4].

2. Descripción y diseño

Se presentan los principales elementos que conforman el diseño de este actuador, estos elementos se seleccionan mediante cálculos que satisfacen los parámetros importantes de funcionamiento que tendrá este actuador, los cuales se obtienen de una tarea específica de transmisión de movimiento lineal a una plataforma móvil. Los principales parámetros de funcionamiento se enlistan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de funcionamiento mínimas para el actuador electromecánico lineal.

Parámetro	Valor
Velocidad Lineal	2 m/s
Torque	1 Nm

Carrera	700 mm
Precisión	± 0.1 mm

2.1 Motor a pasos

Un motor eléctrico produce la potencia rotatoria, pero en el caso típico, los motores funcionan con una velocidad demasiado grande, y entregan un par torsional muy pequeño para que se adapten a la aplicación final de accionamiento [5]. La velocidad, el torque y la precisión del motor son los factores importantes para seleccionar el tipo de motor [6]. Esta transmisión usa un motor a pasos debido a la importancia en la precisión y por el control sencillo de su posición que este tipo de motores presenta. El motor tiene las siguientes características de funcionamiento.

Tabla 2. Especificaciones importantes para la selección del motor a pasos.

Especificaciones Generales	
Velocidad Máxima	2000 RPM
Torque	1.5 Nm
Angulo de paso	1.8 °

Para la selección de la velocidad angular del motor se hace uso de la tabla proporcionada por el fabricante que relaciona la velocidad del motor con el par. Se selecciona una velocidad que permita mantener el torque necesario propuesto en la Tabla 1.

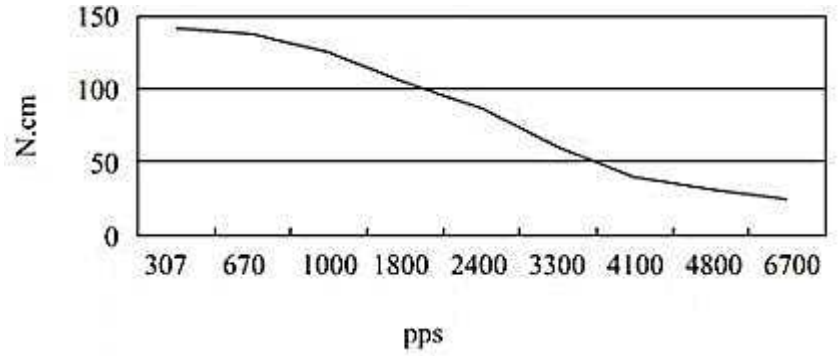


Figura 3. Relación entre velocidad y par del motor.

Los motores a pasos de imán permanente se basan típicamente en devanados en el estator que proporcionan el campo magnético que es seguido por el rotor de imán permanente. Para mover el rotor a una posición deseada se aplica una secuencia de pulsos el cual está limitada por los fabricantes de cada motor, comúnmente en tablas como la anterior o en Hz [1].

La siguiente fórmula es usada para calcular la velocidad angular en RPM requerida en el motor a pasos en base a los pulsos por segundo teniendo en cuenta la limitante del torque.

$$\omega = \frac{F*P*60}{360} \quad (1)$$

Donde:

F: Frecuencia o ciclos por segundo
P: Angulo mínimo de paso (grados)

2.2 Polea dentada

Para determinar la relación de las velocidades angulares se utiliza la siguiente formula:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{D_2}{D_1} \tag{2}$$

Este actuador tiene una relación de velocidad sea igual a 1, esto quiere decir que la velocidad angular y el diámetro de ambas poleas será la misma, ya que el principal objetivo de este actuador es el generar un movimiento lineal con velocidad alta, restando importancia a la potencia transmitida a la polea conducida.

$$\omega_1 = \omega_2 \quad \therefore \quad D_1 = D_2 \tag{3}$$

La velocidad lineal de la correa se calcula mediante la fórmula.

$$V_t = \frac{\pi * D_2 * N}{60 * 1000} \tag{4}$$

Donde:

V_t: Velocidad lineal o tangencial de la correa (m/s)
N: Revoluciones por minuto de la polea menor (RPM)
D_2: Diámetro de la polea menor (mm)

Despejando obtenemos el diámetro necesario de la polea para obtener la velocidad mínima lineal propuesta, quedando la siguiente ecuación:

$$D_2 = \frac{V_t * 60 * 1000}{\pi * N} \tag{5}$$

Una consideración para la velocidad lineal es que no debe sobrepasar los 30 m/s dado que a partir de esta velocidad las fuerzas centrifugas son tan grandes que pueden generar que la banda se salga de la polea [5].

2.3 Correa dentada

En base a la velocidad del motor en RPM (N_o) y la potencia transmitida en la polea (P_C) se realiza la selección de la correa dentada usando la grafica mostrada en la Figura 4. La selección de la banda esta limitada a las poleas del fabricante que se use.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 32, pp.404 – 410, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

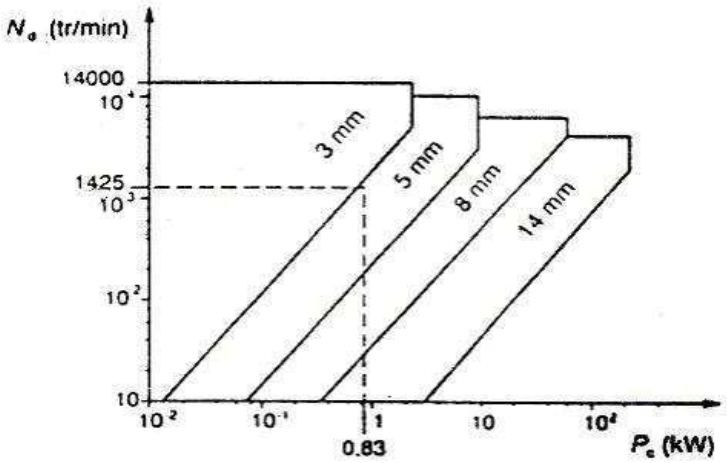


Figura 4. Grafica para selección de correas dentadas de perfil curvilíneo HTD [5]

2.4 Sistema lineal de guiado.

El uso de un sistema lineal presenta la ventaja de tener una resistencia a la fricción estática y dinámica pequeña, lo que brinda una respuesta de movimiento alta, este tipo de sistemas son excelentes para aplicaciones de precisión de posicionamiento con alta velocidad de aceleración y desaceleración [7].

El parámetro importante para la selección del sistema lineal es la desviación del eje, para determinar el diámetro mínimo necesario se hace uso de la siguiente formula.

$$\delta_{max} = \frac{P*l^3}{48*E*I} \tag{6}$$

Con esta formula se obtiene la desviación que tendrá una barra redonda simplemente apoyada en sus extremos, como se ilustra en la Figura 5. Este parámetro repercute en la precisión de posicionamiento que se necesite.

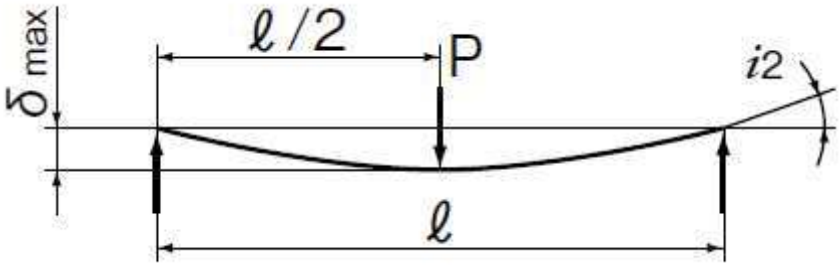


Figura 5. Viga simplemente apoyada en sus extremos con una carga media.

2.5 Actuador electromecánico lineal usando correa dentada

Como resultado final de la selección de los componentes se realiza el diseño y el ensamble de los elementos para obtener una propuesta de actuador lineal el cual analíticamente presenta los siguientes parámetros de funcionamiento contenidos en la Tabla 3. Estos parámetros cumplen con los propuestos en la Tabla 1, estos parámetros contenidos en la dicha tabla fueron propuestos con el objetivo de brindar movimiento a una extremidad de un Robot cartesiano.

Tabla 3. Parámetros obtenidos del diseño.

Parámetro	Valor
Velocidad Lineal	2.8 m/s
Torque	1.3 Nm
Carrera	700 mm
Resolución	0.1 mm

El diseño final del actuador electromecánico lineal se ilustra en la Figura 6. Para el montaje de las poleas dentadas se utilizan chumaceras en ambos extremos que generan la posibilidad de montar cualquier tipo de motor que se requiera, dependiendo de la velocidad lineal y el torque necesario que se este buscando, generando una opción que se pueda adaptar a cualquier tarea.

Para el ensamble del sistema lineal se diseña una base que soporte las chumaceras y brinde el soporte a los ejes lineales evitando mediante anillos de sujeción que se deslicen, de esta forma se garantiza el movimiento lineal a medida que giran las poleas dentadas por acción del motor a pasos.

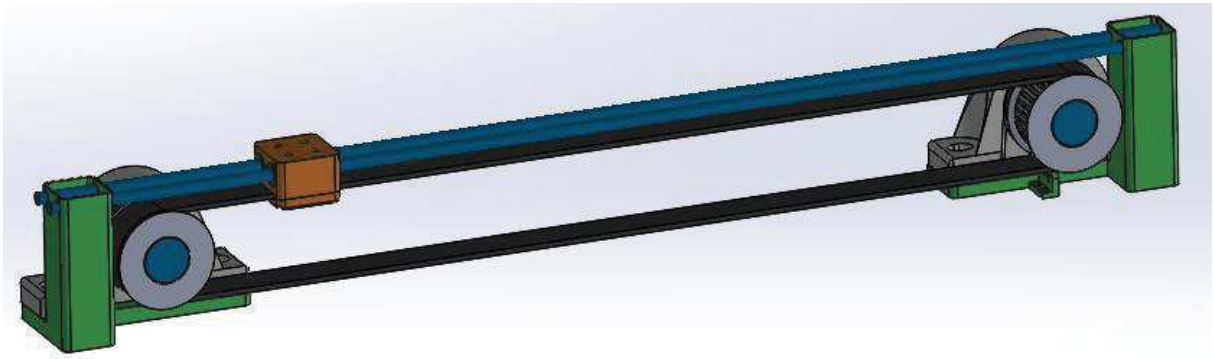


Figura 6. Actuador Electromecánico Lineal con Correa Dentada

Este actuador cuenta con un elemento que es denominado carro deslizante, el cual se observa en color naranja, a este carro deslizante se le ensambla la carga a desplazar, en el podemos encontrar los rodamientos deslizantes que soportaran dicha carga. Esta carga está limitada al torque de los motores.

3. Conclusiones.

El uso de elementos comerciales para la fabricación de este actuador tiene limitantes para la selección de los componentes que cubran con los requerimientos mínimos, en muchos de los casos los elementos seleccionados en este trabajo sobrepasan los valores

mínimos requeridos, sin embargo el propósito final de estos elementos no es la transmisión de potencia de una polea a otra, si no la velocidad lineal y el control de la posición que podamos manejar, es por ello que los principales parámetros para la selección de estos componentes son la velocidad y la precisión que manejan, para obtener un actuador que brinde una velocidad lineal alta para cubrir con los requerimientos en procesos industriales.

Otro aspecto importante para alcanzar los parámetros de funcionamiento y mejorar el desempeño del actuador es implementar un control de posición y velocidad que haga de este actuador una opción rentable para el uso en la automatización de procesos industriales.

El uso de un sistema lineal presenta la ventaja de evitar que la carga a mover sea soportada por la banda, aumentando la carga efectiva que puede soportar, siendo limitada por la desviación que presenten los ejes de dicho sistema lineal, la cual para este caso en particular es despreciable ya que es menor a 0.01 mm.

4. Referencias.

[1] Gomis-Bellmunt O., Flavio L., *"Design Rules for Actuators in Active Mechanical Systems",* Springer Scinece & Business Media, 29 oct 2009.
[2] Creus Solé A.," *Neumática e Hidráulica",* Marcombo Ediciones Técnicas, 6 sep 2010.
[3] Gomis-Bellmunt O, "*Design, modeling, identification and control of mecatronic systems",* Doctoral Thesis, Barcelona, February 2007.
[4] Gomis-Bellmunt O, Galceran-Arellano S, Sudria-Andreu A, Montesinos-Miracle D, Campanile LF, *"Linear electromagnetic actuator modeling for optimization of mechatronic and adaptronic systems."* Mechatronics, March 2007.
[5] L. Mott R., "*Diseño de elementos de máquinas",* Cuarta edición, Pearson Educación,México, 2006
[6] Badrinarayanan S, Ramesh Kumar V, Singh Bhinder K, Ralexander, *"Electro mechanical linear actuator using roller screws"* 2nd International conference on Advances in Mechanical Engineering, ICAME, 9 pag,, 2018.
[7] Nippon Bearing, *"Linear System*", Catologo General No.172S, Primera Edición, 2007.
[8] Lucidarme, Philippe & Delanoue, Nicolas & Mercier, Franck & Aoustin, Yannick & Christine, Chevallereau & Wenger, Philippe., *"Preliminary survey of backdrivable linear actuators for humanoid robots."* (2019).
[9] Huber J.E, Fleck N.A, Ashby M.F, *"The selection of mechanical actuators based on performance indices",* Department of Engineering, Cambridge University, 1997.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 33, pp.411 – 416, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Módulo de Comunicación de Red con Conexión Ethernet y WiFi con Enfoque IoT

Zapien Rodríguez José Manuel, Escoto Sotelo Edgardo Abdiel, Núñez Pérez Francisco Augusto, Ballesteros Pacheco Juan Carlos y Juárez Machuca Erick Rubisell

Universidad Politécnica de Lázaro Cárdenas, Michoacán.
zapien_jomazaro@uplc.edu.mx

Resumen

El continuo avance del desarrollo tecnológico implica un impacto directo dentro de las empresas productivas, esto con el fin de facilitar y reducir actividades a los operadores industriales. Aunado a servicios de comunicación, se logra la transmisión de señales de un punto a otro, sin embargo se requiere de una infraestructura y equipamiento en hardware y software para su correcta implementación.

La comunicación entre los dispositivos para el control industrial de los procesos emplea un cableado abrumador, el cual ha dejado de ser versátil debido a diversas dificultades tales como: fallas en la comunicación por la disrupción de conectividad, dificultad para localización de averías, incompatibilidad de sistemas, costos elevados y limitación para trabajar a distancias elevadas.

La Revolución Industria 4.0 enfoca sus esfuerzos para solucionar una serie de problemáticas recurrentes independientemente del giro empresarial que se dedique, el Internet de las cosas (IoT) proporciona una solución a la problemática de comunicación, esto mediante la implementación de un módulo de control conectado a una red Wi-Fi que facilitará al operador la interacción con otros equipos, sin la necesidad del contacto directo en campo. A través del Wi-Fi se logra conectar los instrumentos locales a los dispositivos de control. El router Wi-Fi transmite datos del dispositivo móvil a su APP eWeLink través de AWS Global del servidor.

Este proyecto sirve como una herramienta innovadora de gran utilidad que puede implementarse en diferentes sectores de la sociedad, que además ofrece alternativas para su uso en base a las necesidades operativas de la red, tales como la adaptación de sistemas, interconexión de mayor número de dispositivos de control, reinstalación y movilidad.

Palabras clave: IoT, Industria 4.0, Comunicación Inalámbrica, Arduino.

1. Introducción

La finalidad primordial en la automatización industrial es que se realicen las actividades de manera continua con la poca interacción de personal con el proceso productivo, relegándose a actividades de supervisión y mantenimiento del equipo [01]. Hoy en día las tecnologías existentes nos permiten monitorear las variables de manera remota, anteriormente el control tenía que ser tan robusto como lo que se quería controlar, actualmente con los smartphones, las APPs y un pequeño servidor se puede montar un módulo que logra monitorear y controlar sistemas.

El módulo de enlace a red tiene como uno de sus objetivos el abaratar costos en el monitoreo y control de señales y con ello darle un sin fin de aplicaciones en la pequeña y mediana empresa, siendo escalable a industrias de gran magnitud.

Los sistemas de control industrial SCADA han sido del tipo punto-multipunto a través de estándares de comunicación como RS-232, RS-485 o BEL-202 entre otros [02]. Con la llegada del Protocolo de Internet (IP), la tecnología de conexión a Internet se ha incrementado. Así, un control basado en un entorno web hace uso de la tecnología IP y permite, mediante los estándares empleados para la comunicación a través de la red (fibra óptica, RJ-45, redes inalámbricas), conectar el sistema de adquisición de datos diseñado íntegramente en web a través de un determinado servidor.

Las iniciativas por el control remoto o a distancia tienen su origen en 1901 cuando Marconi envió el primer impulso a través de las colinas boloñesas para accionar una campanilla. Pero eso requería gran equipamiento de elementos eléctricos y su deficiencia de trasmisión de datos. Internet ha revolucionado el mundo, en menos de 40 años ha alcanzado más de 4,4 billones de usuarios [03].

La seguridad en el uso del internet ha mejorado en los últimos 5 años, mediante el cifrado de datos, además de exigir el uso de un PIN para establecer conexiones entre redes y usuarios. Así mismo, las redes que usa el módulo pueden tener varios niveles de seguridad según se requiera, desde un login en la página web a solo el WPA de la red de Internet.

La revolución de la industria 4.0, consiste en la digitalización de los procesos industriales por medio de la interacción de la inteligencia artificial con las máquinas y la optimización de recursos. La industria 4.0 fusiona digitalmente diversas disciplinas garantizando la satisfacción del cliente y la personalización de servicios [04]. Uno de los objetivos de esta revolución es la unión entre tecnologías digitales que permiten la creación de mercados inéditos y la interacción entre actores económicos.

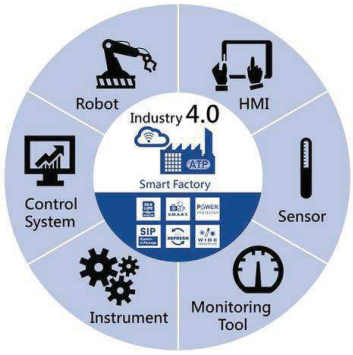


Figura 1. Industria 4.0

El internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) se considera como un sistema de dispositivos interrelacionados que tienen identificadores únicos y la capacidad de transferir datos a través de una red [05], es por ello la relevancia del prototipo presente.

Figura 2. Conexión del Internet de las Cosas

El módulo tiene dos modalidades de conexión, en un primer plano se tiene la conexión por Ethernet el cual soporta un puerto para un conector RJ45 con el que se puede crear un enlace con un router o swich con una aplicación de montaje estático, la segunda forma de conexión es por Wi-Fi el cual soporta los tipos de encriptación de red, además de poder configurarse como host, o servidor, o como ambos, esta modalidad es para lugares donde no existe cableado de red o aplicaciones móviles.

El módulo tiene un montaje y operación sencilla con una plataforma fácil de interactuar, cuenta con una página web determinada a las necesidades de la aplicación donde se va a emplear. Además, que para comunicarlo a la red es solo cuestión de conectar un cable RJ45 y dejar programado el SSID y KEY en el caso del Wi-Fi, con lo que no es necesario realizar su configuración cada vez que se encienda.

2. Metodología

Este proyecto tiene como finalidad el monitoreo y control de variables de forma remota y virtual por medio de un prototipo de módulo de enlace a Red, con el uso de componentes de bajo costo, y que tenga el soporte de conectividad en red Internet y Wi-Fi.

2.1 Diseño y Construcción del Módulo

Se utilizará como base de construcción del prototipo el Arduino MEGA2560 en cuál es el encargado de procesar las señales de entrada y salida, además que el mismo será el proveedor para las peticiones en red, así mismo es el encargado de publicar el código HTML y CSS para que el navegador muestre la página web del módulo, en conectividad tenemos el uso primeramente de la shield Ethernet W5100 que cuenta con un puerto RJ45 y soporta lectura de tarjetas SD.

Para el caso de la conectividad Wi-Fi se logra con un módulo ESP8226 que tiene soporte para la gama de encriptaciones de redes actuales y que además cuenta con una memoria EPROM para los datos y configuración de red. Todo esto montado en un gabinete NEMA IP55 el cual es hermético por lo que el polvo industrial no es un problema y presenta una protección contra chorros de agua directos, asegurando su aplicaciones en la intemperie.

Figura 3. Gabinete Plexo con Protección NEMA IP55

2.2 Selección y Configuración de los Periféricos

Arduino es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador re-programable y una serie de pines hembra, los que permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores de una manera muy sencilla [06].

El Arduino MEGA2560 tiene la capacidad de dar soporte a variables de entrada tanto lógicas como digitales, tiene 54 input/output para digitales y 16 para señales analógicas. En el caso de las salidas, todas ellas serán digitales, en este módulo en primera instancia se tiene conexión a relevadores para dar potencia a los actuadores, con la posibilidad de tener salidas por TRIAC, SCR, MOC, entre otras.

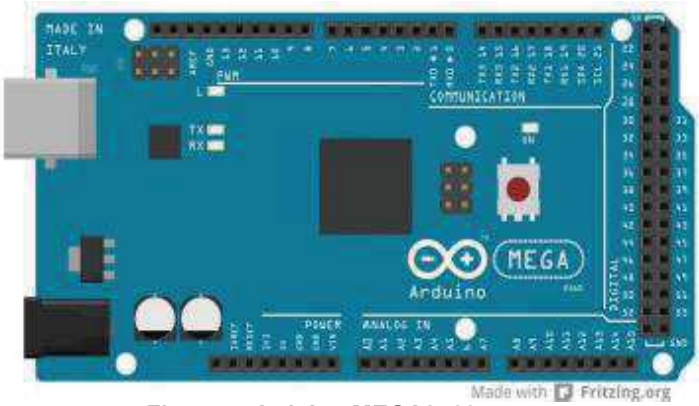


Figura 4. Arduino MEGA2560

Este prototipo pude funcionar en condiciones climáticas extremas, por lo que su temperatura de operación de los elementos de control debe ser la adecuada, el microcontrolador ATMEGA2560 es un buen candidato para tal aplicación, debido a que cuenta con una temperatura de operación de -40° a 85° aproximadamente, aclarando que no es el único a utilizar, se puede remplazar por un similar que cumpla con los requerimientos.

El módulo Wi-Fi a elegir deberá ser compatible con el tipo de red a utilizar y tener el alcance necesario para una buena comunicación, para el caso de la shield ethernet debe ser compatible al conector RJ45 o el que use el router.

El módulo ESP8266 es un componente que permite una conexión de sistemas a redes Wi-Fi, compatible con el protocolo 802.11b/g/n, y operando con un rango de frecuencia de 2.5GHz, que funciona como un punto de acceso (Access Point) o como una estación, de envío y recepción de datos [07], la comunicación con Arduino se puede hacer mediante el uso de los puertos en serie RX y TX, se pueden configurar a través de comandos AT.

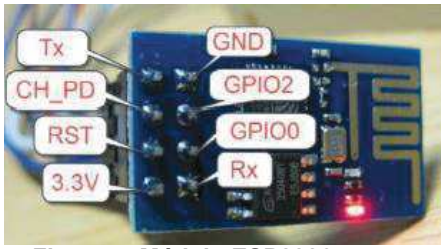


Figura 5. Módulo ESP8226.

2.3 Estructuras de Control

El prototipo utiliza un algoritmo que publica en el puerto 80 el código HTML y CSS de la página Web, manteniendo conectados de forma permanente ambos módulos para tener una acción inmediata al recibir un dato siempre y cuando estén en la misma red o en la dirección IP del módulo. La figura a continuación muestra las formas de configurar la conexión. Puede tener un solo cliente o un conjunto de ellos, ambas modalidades de conexión tienen ese soporte.

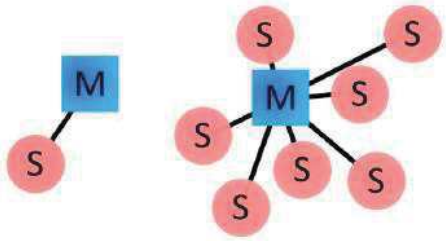


Figura 6. Tipos de Comunicación soportados.

Un servidor web es una computadora que guarda y transmite datos vía Internet. La información que almacenan es en forma de página Web, cuando un cliente (navegador Web) accede a un servidor Web, envía una petición HTTP que recibe el servidor Web, luego este envía la información a través de protocolo HTTP al cliente en formato HTML.

Cuando se pone esta dirección IP en un buscador Web de un ordenador conectado a la misma red (o desde fuera a través de Internet si se abre un puerto que direccione a la IP del Arduino), se envía una petición HTTP. Cuando el Arduino lea esta petición, enviará el código HTML para que se visualice en la página Web en el navegador, así el diagrama de flujo del control utilizado en el módulo se muestra a continuación:

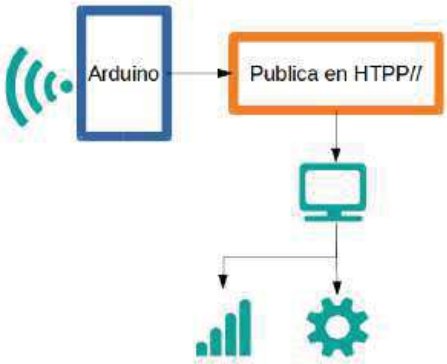


Figura 7. Control del modulo

Como se observa en la Figura anterior, el Arduino carga la página en el puerto 80, en ella se dan las instrucciones o peticiones al servidor montado en el módulo, el Arduino las recibe y toma las acciones correspondientes a la misma, por otra parte, el Arduino toma las lecturas de sensores y las publica en la página teniendo lecturas de forma remotas.

3. Resultados

El control por en red es muy eficiente en distancias considerables, aunque el Arduino mega no tiene una gran capacidad para el procesamiento de código HTML, en aplicaciones mayores puede usarse el Arduino DUE o una placa Raspery Pi. Los resultados en este punto son favorables aun con posibilidades de mejorar y con la posibilidad de ser un dispositivo robusto y eficiente en aplicaciones domóticas, industriales y domésticas.

La página web se logra con la ayuda de la integración de código HTML y CSS en el código principal del Arduino logrando una visualización agradable y fácil de usar, de esta manera el control de un sistema independientemente del proceso que se esté efectuando en la empresa, se puede realizar de manera remota por medio de una conexión vía internet, mediante el acceso de la comunicación por un dispositivo sin la limitante del cableado y todas las consecuencias que representa tanto en pérdidas económicas como de información, todo esto con un costo relativamente bajo.

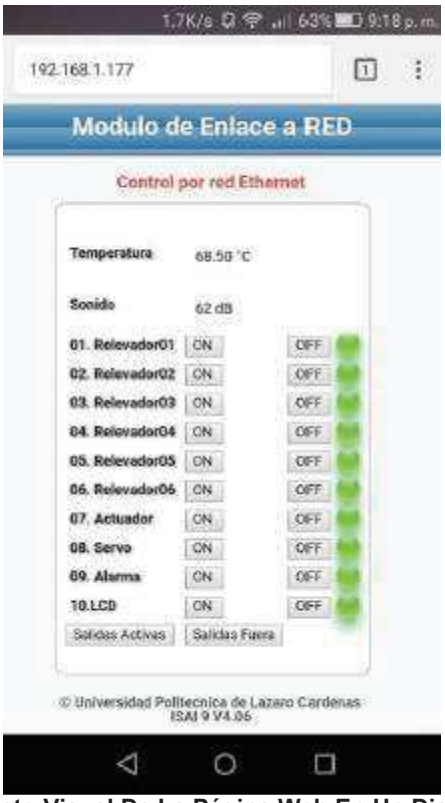


Figura 8. Aspecto Visual De La Página Web En Un Dispositivo Móvil

Este prototipo tiene proyección a emplearse en industrias, donde la toma de decisiones que requiera visualizar el comportamiento de las variables en tiempo real por parte de los ingenieros, pueda efectuarse en cualquier momento, aun cuando no se está presente en el campo o el cuarto de control para tomar la medición y decidir las acciones correctivas a realizarse.

Referencias

[01] Martínez Sánchez, V. Á. (2001). Automatización industrial moderna. *Alfaomega, 1ª Edición, México*.

[02] Qiu, B., Gooi, H. B., Liu, Y., & Chan, E. K. (2002). Internet-based SCADA display system. *IEEE Computer Applications in Power*, *15*(1), 14-19.

[03] Rodríguez, R. V. (2018). Aplicaciones y tecnologías para el desarrollo de la internet de las cosas. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, *1*(3), 88-97

.

[04] Del Val Román, J. L. (2016, October). Industria 4.0: la transformación digital de la industria. In *Valencia: Conferencia de Directores y Decanos de Ingeniería Informática, Informes CODDII*.

[05] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, *29*(7), 1645-1660.

[06] Goilav, N., & Geoffrey, L. (2016). *Arduino: Aprender a desarrollar para crear objetos inteligentes*. Ediciones ENI.

[07] Schwartz, M. (2016). *Internet of Things with ESP8266*. Packt Publishing Ltd.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 34, pp.417 – 427, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Diseño de Arquitectura IoT para los Boliers en el Proceso de Elaboración de Malta de Heineken Puebla

Sánchez Cuapio Iván Jesús[1], Conde Camacho Julián[1], Tlapale Hernández Salvador[1], Cervantes Castillo Ma. Guadalupe[1] y Gutierrez Atecpanecpatl Jonathan[1]
Universidad Tecnológica de Tlaxcala ([1])
ivan.sanchez@uttlaxcala.edu.mx

Resumen

Actualmente existe una colaboración de trabajo entre la Universidad Tecnológica de Tlaxcala y la empresa Heineken de Puebla, de la cual ha surgido la petición por parte de la empresa de fortalecer tecnológicamente la infraestructura de la instrumentación, la necesidad planteada surge del proceso de elaboración de la malta y específicamente del control que se debe tener de los parámetros de temperatura y presión del agua que se suministra a este proceso delicado.

Innovar tecnológicamente dentro de una empresa, ya tiene un común distinguido y que todo el desarrollo busca, el trabajo con metodologías basadas en la Revolución Industrial 4.0, debe ser empleado si se planea que el modelo de innovación persista en tiempos futuros, la integración de sistemas informáticos toma un lugar muy importante dentro de estas estructuras porque se debe integrar el concepto del Internet de las Cosas.

En este capítulo se describe el diseño de integración de toda una arquitectura de adquisición, trasmisión y almacenamiento, que puede ser implementada en la planta cervecera y que determina sus componentes de un análisis de características y optimización dentro de un ambiente industrial, para así llegar a delimitar los puntos críticos del proyecto y que permitan su implementación, publicación y reproducción en ámbitos similares.

Palabras clave: Diseño, Adquisición, Trasmisión, Almacenamiento, Publicación.

1. Introducción

La importancia e innovación que se viene presentando en la industria con la llegada de la reciente revolución tecnológica, ha provocado que los procesos requieran de explotar esos beneficios e iniciar una migración hacia esos nuevos horizontes. Conceptos como el Internet de las cosas “IoT”, cada vez están haciendo más presencia en puntos fundamentales del quehacer cotidiano, así como, la “BigData” quien soporta una importante cantidad de datos con la cual se han de tomar decisiones[1].

Esta metodología ha iniciado con gran fortaleza en puntos individuales y cotidianos de las personas; así mismo se ha podido establecer que industrialmente se presenta como una herramienta útil al momento de estudiar y optimizar los procesos productivos.

Llevar de lo habitual a la industria, requiere que estas herramientas deban ser adaptadas a las particularidades de cada una de las empresas y de sus procesos como tal. En Heineken la producción de malta requiere de uso de agua con una temperatura adecuada, suministrada por Boilers que realizan el calentamiento de la misma, el suministro debe cumplir con cierta presión en su caudal que sea adecuado, considerando a estas dos variables críticas para el cumplimiento de este proceso.

El trabajo del IoT considera llevar y almacenar la información de los procesos a la denominada “Nube”, que permite dar portabilidad a la información y el fácil acceso a la misma, esta tarea requiere del trabajo de un sistema que considere la adquisición de los datos del propio proceso, la interpretación de la información, la puesta sobre un servidor, un subsistema que se encargue de trasmitir estos datos de manera local a la empresa y finalmente el desarrollo de una aplicación móvil específica y de uso propio para el acceso en tiempo real del comportamiento de los sensores del proceso[1].

El tener información publicada de los datos de un proceso industrial requiere de tener el cuidado necesario de que esa información no sea obtenida por personas ajenas al proceso, debido a ello el sistema no tendrá conectividad global con el internet, solo se establecerá el servidor para un acceso local y restringido, considerando un área circundante a la empresa limitada.

Para dar más fortaleza a la herramienta se desarrollarán interfaces gráficas en el servidor y dispositivos móviles (Smartphone), que además de dar acceso a la información se establecerán sistemas de alarmas que permitan optimizar el monitoreo de estas variables dentro de las instalaciones de la empresa.

2. Diseño de arquitectura IoT para los boliers en el proceso de elaboración de malta de Heineken Puebla

El proceso de elaboración de malta requiere del suministro de agua con parámetros de temperatura entre 115°C y 135°C, así mismo se debe asegurar que la presión de suministro del agua debe cumplir con un rango entre 5 y 6 bar, además de que debe darse la certidumbre de la medición que se obtenga. Estos valores en las variables pueden considerarse críticos para el proceso puesto que si no se cumplen la elaboración de malta puede estar fuera de estándares de calidad [2].

El trabajo de preparación del agua se realiza a partir de boilers que calientan el líquido y que deben alimentar a la siguiente etapa de manera adecuada. Trabajar con estas variables considera tenerlos en el proceso de manera estable y deben estar visibles la mayor cantidad de tiempo, debido a que su salida del rango habitual es prescindible para el proceso y la seguridad. Este monitoreo se realiza en la planta de manera local, lo que provoca que un operador deba estar al pendiente en todo momento de su lectura; sin embargo, los operadores mantienen distintas tareas en la planta lo que considera un descuido del valor en el que se está desarrollando el proceso [2].

2.1 Diseño de la Arquitectura

Dar portabilidad y libertad en el acceso a la información a los operadores es proporcionarles una herramienta que agregue confiablidad al trabajo de supervisión de la dispensación de agua, al mismo tiempo se marca un inicio del trabajo con ideologías de revolución industrial 4.0 que serán demandadas en tiempos cercanos para los procesos industriales.

En la Figura 1, se muestra el concepto globalizado de la integración de un sistema que permita generar el monitoreo de las variables dentro del proceso.

Figura 1. Arquitectura del sistema de adquisición.

De la propuesta realizada se deben delimitar las áreas que son los pilares para el desarrollo del proyecto y que se describen en los siguientes apartados.

2.2 Selección del sistema sensorial de temperatura y presión en el suministro de agua

Inicialmente la tarea que debe realizarse es la obtención de los parámetros involucrados en la elaboración de la malta y a los cuales se busca darles portabilidad, ya se ha mencionado que los rangos de temperatura y presión son fundamentales para el proceso y que su visualización sea constante y confiable.

Actualmente el sistema sensorial alimenta un sistema de visualización que está trabajando óptimamente, sin la portabilidad adecuada, debido a que el indicador se encuentra en las líneas que alimentan al boiler. Este tipo de sensores ya cuenta con una entrega de señales eléctricas que pueden ser utilizadas para la tarea propuesta; sin embargo se considera mantener a este método como un respaldo al sistema que busca desarrollarse.

La propuesta inicial para lograr la adquisición y trasmisión de datos busca involucrar elementos similares pero redundantes en el proceso, quiere decir que un par de dispositivos alimentarán el monitoreo local y otro par al monitoreo remoto. La adquisición de las señales se logra a partir de dispositivos como los que se muestran en la figura 2 y 3.

Figura 2 Sensor PT100

Figura 3 Sensor PX409

A partir de este concepto se debe alimentar una segunda etapa y dar la conectividad requerida. Para este punto se considera el manejo de elementos como la Tarjeta de E/S-FLX3402. Que se muestra en la figura 4.

Figura 4. Tarjeta de entradas y salidas.

Este módulo propuesto puede recibir señales de sensores con características de 4-20mA, de 0-5V, o señales de 0 a 24V, las cuales mantienen un standard de los sensores industriales más comunes. Y debe ser complementada con etapas de trasmisión para su envió al servidor que contendrá y distribuirá la información.

Una alternativa a lo presentado anteriormente, establece integrar sensores que permitan la opción de conectividad inalámbrica implícita en el mismo dispositivo, en la figura 5 y 6 se muestran los sensores con capacidad de conectividad Wi-Fi, los cuales pueden ser tomados por la siguiente sección.

Figura 5 UWPC-2-NEMA

Figura 6 PT100-UWRTD-NB9

2.3 Integración de conectividad bajo la metodología IoT

Cuando se menciona dar movilidad al monitoreo de las señales no se debe perder de vista que se trata de que esos datos cumplan con la metodología IoT, esto quiere decir que además de lograr visualizar la información de manera inalámbrica también se debe tener un formato que permita almacenar estos datos, para generar análisis que posteriormente se plasmen como acciones correctivas o de mejoras en el proceso.

Existen distintos protocolos para realizar el envió de la información y así mismo variadas técnicas para asegurar la correcta recepción de los datos, sin embargo bajo la integración de la revolución industrial 4.0, se ha manifestado un sobresalto del uso del protocolo TCP/IP como el método de comunicación dentro de las industrias. Así mismo la portabilidad de la capa física del envió se constata bajo el protocolo WI-FI, dando la flexibilidad de lo inalámbrico al sistema.

La adaptación al ambiente industrial y la portabilidad de los datos obtenidos por los elementos anteriores, se completan con los elementos propuestos mostrados en la figura 7 y 8.

Figura 7 Flexy20500. Gateway para acceso remoto

Electrical Data		
Frequency Range (MHz)	698-960, 1710-2700	
Operational Band	LTE 700 ; AMPS / GSM850 ; GSM900 ; GSM1800 ; PCS1900 ; 3G UMTS ; 2.4GHz WIFI ; 2.6GHz LTE	
VSWR	< 2.5:1	
Peak Gain: Isotropic	698-960MHz	2dBi
	1710-2700MHz	4dBi
Radiated Efficiency	> 70%	
Pattern	Omni-directional	
Polarisation	Vertical	
Impedance	50Ω	
Max Input Power (W)	60	

Mechanical Data		
Dimensions (mm)	Height Mounted	164 (6.46")
	Diameter	48 (1.89")
Operating Temp (°C)	-40°/+80°C (-40°/176°F)	
Material	ABS,, Aluminium and Galvanised Steel	
Colour	Black & Natural	

Figura 8 FLB3205. Tarjeta celular 3G/4G

Hasta este punto se tiene cubierta la parte de adquisición y envió de las señales obtenidas en los sensores de los boilers, de temperatura y presión, necesarias para la elaboración de la malta. Y ahora el enfoque considera el paso al trabajo informático y de sistemas que permitirá dar el potencial al proyecto.

2.4 Desarrollo del Servidor

Los datos del proceso estarían listos para ser enviados por el aire; sin embargo se requiere de un servicio de alojamiento y retransmisión para un número de usuarios establecido. Ahora se hace el planteamiento del desarrollo de una interfaz gráfica de adquisición, para generar la interacción con los datos obtenidos del monitoreo del proceso de calentamiento de agua para la elaboración de la malta.

Dado que el servidor será el encargado de proporcionar los servicios web y además proporcionará una aplicación para la visualización de los datos en tiempo real. Se considera que el sistema operativo más adecuado es el sistema operativo Linux por ser un sistema seguro con respecto a ataques por virus y dado que los datos se visualizarán a través de una aplicación móvil.

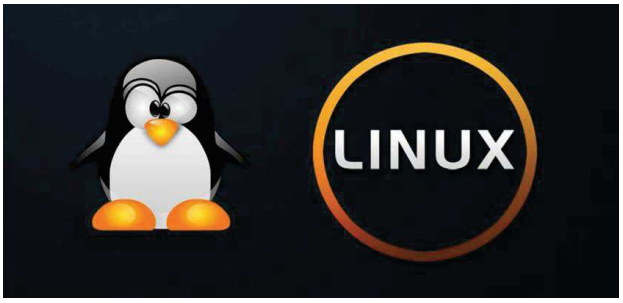


Figura 9 Sistema Operativo LINUX

El gestor de base de datos será PostgreSQL debido a que actualmente es el más potente y robusto además de contar con una estabilidad y confiabilidad, considerando que en registros actuales no se han presentado caídas de base de datos debido a sus entornos de alta disponibilidad.

Figura 10 Gestor PostgreSQL

En cuanto a características específicas del servidor se está considerando un servidor HPE ProLiant DL360 Gen10 por ser servidores que permiten ser escalables y adaptables a las necesidades de la empresa, proporcionar seguridad, agilidad y flexibilidad. Además ofrecen una memoria persistente que permite que los datos se almacenen, muevan y procesen rápidamente, características esenciales para el monitoreo de procesos en tiempo real. Los servidores DL 360 también proporcionan tecnología innovadora en seguridad para proteger el servidor de ataques, detectar posibles intrusiones y recuperar el firmware de forma segura.

Figura 11 Servidor HPE ProLiant DL360 Gen10

La tarea que se busca realizar es la recepción de información de las tarjetas de adquisición de datos que son enviadas vía Wi-Fi, desde el proceso, así que se debe establecer una conexión para el protocolo TCP/IP. Normalmente esta tarea se realiza configurando puntos de conexión o Sockets de los cuales se accede a la información. Almacenar la información para tener registros y monitoreo de los parámetros, permitirá generar historiales del proceso que demuestren su funcionamiento y que establezcan información que pueda ser utilizada posteriormente para determinar planes de mantenimiento predictivo o preventivo.

2.5 WebService

El servicio prestado que se busca implementar además de la conexión a una base de datos, considera la divulgación y publicación de los datos del proceso, entre los operadores de la empresa que deben recorrer las instalaciones cumpliendo con sus tareas de supervisión y corrección. Por lo tanto ahora se busca establecer un WebServer que alimente la interfaz que aparecerá en una aplicación móvil y que contará con la visualización del comportamiento del sistema de adquisición, así como le verificación del historial almacenado.

Si el objetivo es desarrollar aplicaciones que se ejecuten en un servidor web y que estas puedan guardar datos e información de un proceso se debe elegir una herramienta adecuada y que de soporte para la tarea de conectividad múltiple y almacenamiento de datos. El servidor web propuesto deberá ser un programa que utilice HTTP para mostrar los archivos y datos en una página web a los usuarios, en respuesta a sus solicitudes. En este caso los servidores web y los clientes web son dos aplicaciones separadas, por lo que debe haber un lenguaje común para la comunicación. HTML es el lenguaje que permite conectar al servidor y al cliente. Ahora, entonces se requiere de configurar a un servidor de aplicaciones, iniciado en LINUXy que ejecutaran el código de consulta de la base de datos y la publicación de la información.

Tomcat es el servidor de aplicaciones más popular utilizado con las aplicaciones web Java desarrolladas por Apache Software Foundation. Algunas fuentes afirman que la participación de mercado de Tomcat es más del 60% de todas las implementaciones de servidores de aplicaciones Java .

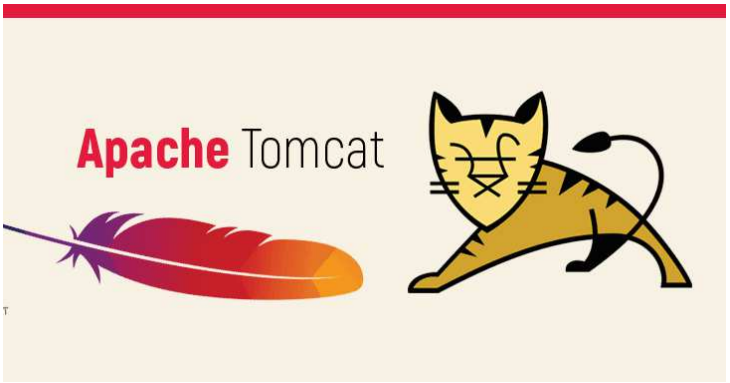


Figura 12 Apache TomCat

El desarrollo de Aplicaciones Web con Java tiene una arquitectura diferente al desarrollo de aplicaciones de escritorio, es así que aparte de la instalación del JDK de Java tenemos que configurar un servidor, que tienen función gestionar las peticiones del lado del servidor y devolver una respuesta al cliente, claro está que para esto se ayuda de los servlets que contienen el código a ejecutar de acuerdo a la petición del cliente.

2.6 Desarrollo de la app

Con las características mencionadas en el punto anterior se requiere de desarrollar una aplicación móvil que soporte el trabajo con protocolos de aplicaciones web, para acceder al servicio prestado, la aplicación móvil busca ser una interfaz que contenga información en tiempo real de los parámetros de temperatura y presión y al mismo tiempo la opción de acceder a los registros tomados por el servidor en su memoria.

Para el desarrollo de dichas app se dispone de trabajar con la plataforma Android Studio, por la capacidad de la plataforma de interconectar con los requerimientos establecidos, así como con el aseguramiento de estabilidad y amplia seguridad.

Figura 13 Android Studio

El Layout que aparecerá en la pantalla del Smartphone deberá tener inmediatamente a la vista la imagen representativa de los vúmetros que pertenezcan a las mediciones enviadas de temperatura y presión, considerando de un inicio realizarlo para un solo boiler. En un Form posterior se deberá dar opción de la consulta de historiales, de acuerdo a un sistema de filtrado de datos que permita hacer la consulta considerando fecha y hora.

Para brindar la seguridad que el sistema requiere se busca establecer la implementación de esta aplicación a solamente tres usuarios, los cuales deben presentar sus credenciales de seguridad y autorización. Así mismo este móvil debe ser de aplicación específica, por lo que los recursos propios deberán estar destinados únicamente a esta aplicación, para ello se busca trabajar con el sistema operativo Android 5 LolliPop, por la compatibilidad que puede dar a distintos equipos de mercado y que no darían problemas de funcionamiento.

Figura 14 Andorid LolliPop

2.7 Arreglo de antenas de distribución local de señales Wi-Fi

Uno de los puntos medulares del proyecto refiere al aseguramiento del envió de los datos a las aplicaciones móviles desde el servidor. En las visitas a planta se ha podido observar que los operadores y encargados de la vigilancia de los parámetros, realizan distintas funciones dentro de la empresa y no están únicamente a cargo de los boilers, esto sugiere trabajar con el envío de los datos considerando la infraestructura, distancia y diversos parámetros del entorno para su propagación.

La estructura propia la empresa requiere que las señales de Wi-Fi puedan ser enviadas por estrechos que involucran muros de grosor importante, el paso hacia sótanos, el traspaso por ruido mecánico, eléctrico y térmico; así como su propagación hacia el exterior. Todos estos parámetros deben ser considerados para la propuesta de integración del sistema de antenas que permitan lograr el objetivo, sin propiciar un excesivo intercambio de señales que afecten la tarea principal.

Argumentando la seguridad y privacidad en la publicación de los datos, se hace pertinente seleccionar a las antenas propuestas, como repetidores del protocolo y no así como accespoint, debido a que no se dará acceso a más dispositivos y solo se administrará el envío a dispositivos específicos. Las antenas propuestas para la propagación se consideran de manera inicial las mostradas en a Figura 15.

Figura 15 Repetidor TP-Link TL-WA855RE

Con esta base se podrán obtener muestras de potencia de la señal en instalaciones de la empresa para determinar el arreglo óptimo para la difusión de la información. Asegurando el monitoreo de los parámetros dentro de la empresa y hasta un área circundante a la empresa con una lejanía no mayor a 300 mts. Y que pueden ser utilizadas las mismas antenas o se consultaría un cambio en sus características de potencia.

3. Resultados

A lo largo de este trabajo se ha desarrollado la estructura y propuesta de integración de la arquitectura que permita el monitoreo de parámetros en la elaboración de malta en la empresa Heinieken Puebla, es importante registrar que esta propuesta ha sido presentada y considerada por el personal adecuado dentro de la compañía, en este escrito solo se muestran los puntos primordiales de los componentes de la arquitectura y que debido a la confidencialidad que debe manejarse en este trabajo, no se pueden exhibir registros reales del trabajo en planta.

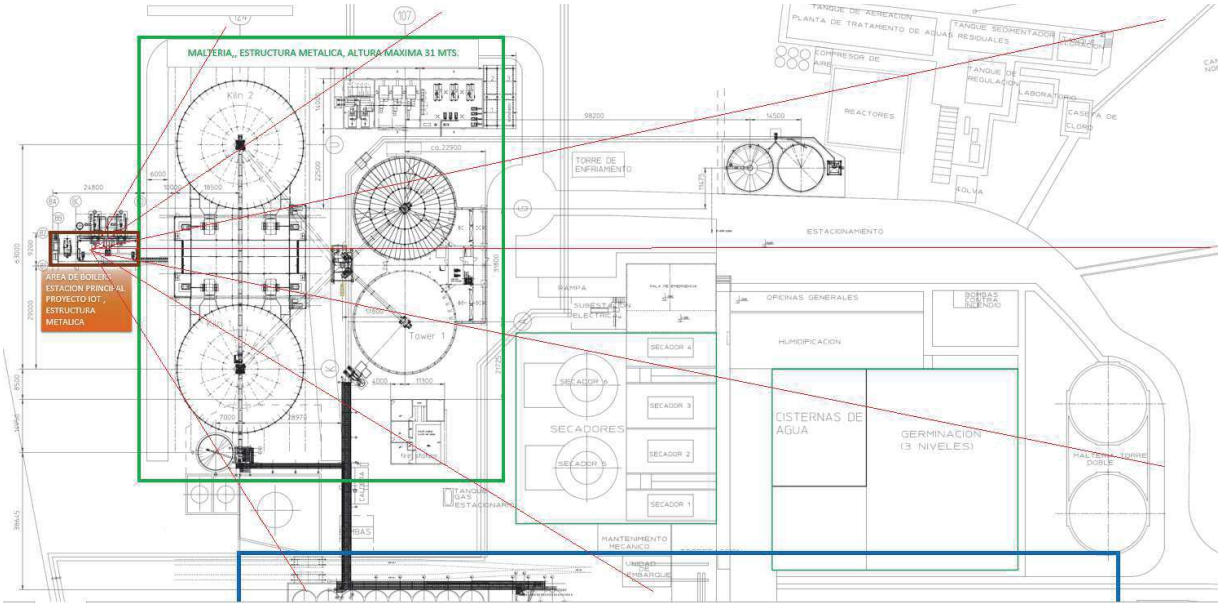
La instrumentación del proyecto refiere a la adaptación del sistema redundante de monitoreo sobre las líneas de agua, la implementación de los sensores y la tarjeta de conectividad solo requiere de una toma sencilla a la línea. El desarrollo del servidor se ha probado en las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Tlaxcala y tiene la fortaleza para determinar su funcionamiento dentro de la empresa.

Los puntos con los cuales se trabaja actualmente son los del desarrollo de la aplicación móvil, debido a que se requiere de la conectividad del sistema completo para determinar el trabajo real de los datos; así mismo se están estableciendo alarmas visuales y mecánicas que permitan al operador anticipar comportamientos de los boilers. El servicio Web, también requiere del trabajo en campo de la adquisición de datos para determinar el acceso a los datos, así como el trabajo con los historiales.

El apartado del diseño de arreglo de las antenas, es un punto de trabajo futuro y prolongado, de inicio la trasmisión del sistema de boilers al servidor considera distancias y parámetros fijos y no es complicado determinar un tipo de antena que cumpla con el objetivo. Pero el arreglo que logrará propagar los datos a las aplicaciones móviles requiere de un análisis muy específico. En estos momentos no existen muchos registros del estudio de propagación de las señales dentro de ambientes cerrados e industriales. El siguiente punto importante en esta línea, es obtener el modelo matemático de este fenómeno, considerando las restricciones solicitadas.

4. Conclusiones

En la figura 16 se muestra el Layout de la empresa donde se desarrolla la implementación del proyecto y que es uno de los únicos registros que se permiten difundir de la empresa en el cual se observan los puntos primordiales del proyecto.



Aquí se observa la posición de los boilers que suministran agua al proceso de elaboración de malta y de los cuales se extraen los datos des sistema IoT propuesto. También se pueden identificar las secciones de la empresa y las características de los materiales que lo integran, con el afán de determinar las líneas de vista que involucran la propagación de las señales, determinando así los puntos de muestreo que coincidan con lugares adecuados en la instalación de las antenas repetidoras. Las visitas de campo continúan realizándose puesto que un trabajo como este iniciara con precedentes en la integración de tecnologías propias de la Revolución 4.0.

Referencias

[1] Alasdair G, Nonthaburi B. *"Industry 4.0: The Industrial Internet of Things",* APRESS, Tailandia, 2016.
[2] Heineken 2018.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 35, pp.428 – 444, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Diseño y Construcción de un Robot Paralelo de Seis Grados de Libertad 6-UPUR

Cortes Ruiz Hugo Javier[1], Arias Montiel Manuel[1] y Tapia Herrera Ricardo[2]

[1]Instituto de Electrónica y Mecatrónica, Universidad Tecnológica de la Mixteca.
[2]CONACYT- Universidad Tecnológica de la Mixteca.

Resumen

Se presenta el diseño y la construcción de un prototipo de robot paralelo de seis grados de libertad. El objetivo del proyecto es obtener un prototipo experimental que pueda ser utilizado como apoyo en tareas de enseñanza y también en actividades de investigación en el campo de los robots paralelos. Entre las aplicaciones potenciales para el prototipo desarrollado, se plantean la validación del análisis cinemático (de posición, de velocidad y de aceleración), la validación del modelo dinámico del mecanismo paralelo y la implementación de tareas de seguimiento de trayectorias mediante el diseño de esquemas de control. También se desarrolla una interfaz que permite la operación del robot de una manera sencilla e intuitiva mediante una tarjeta Arduino y computadora personal. Se describe el proceso de selección de configuración para las extremidades, los componentes en cada extremidad, la manufactura del robot y la instrumentación del mismo. Finalmente se describe y se presenta la interfaz desarrollada para la operación del robot.

Palabras clave: Robot paralelo, interfaz gráfica, prototipo mecatrónico.

1. Introducción

El uso de los robots resulta vital para el desarrollo de las actividades en las industrias, son bienes sumamente importantes para el desarrollo de los procesos productivos, en particular si lo que se desea hacer es agregar precisión y exactitud a los procesos, además de flexibilizar las líneas de producción [1], [2].

Actualmente, la mayoría de las actividades en las que se ven involucrados robots para realizar alguna tarea en específico se realizan a partir de robots del tipo serial, cuya configuración presenta eslabones que se conectan uno al extremo del otro, así hasta llegar al efector final, por lo que se trata de mecanismos que se conforman de una sola cadena cinemática [3], [4]. Sin embargo, se observan algunas desventajas de los manipuladores bajo esta configuración, entre las que se encuentran: la pérdida de precisión del efector final conforme se extiende el espacio de trabajo, un incremento considerable en la fuente de potencia del robot al incrementar la carga que puede soportar y estructuras pesadas que se ven afectadas por su propia inercia [1], [2], [5].

Dadas las desventajas anteriores, los manipuladores del tipo paralelo representan la opción más adecuada para sustituir a los robots seriales, ofreciendo solución a la mayoría de las desventajas mencionadas. Los robots paralelos son mecanismos formados por cadenas cinemáticas cerradas, por lo que la plataforma móvil (efector final en los robots seriales) se conecta al menos por dos cadenas de eslabones a la plataforma fija (referencia o bancada del robot) [1], [6].

Como se menciona en la definición anterior, los robots paralelos están formados por múltiples cadenas cinemáticas que pueden observarse como extremidades, de aquí que puedan soportar cargas mucho mayores con estructuras más ligeras en comparación a su contraparte serial, esto debido a la distribución de la carga por todas las extremidades, de esta misma característica se obtiene el hecho de que la fuente de potencia resulta mucho menor al tener que mover elementos con

menos masa. Del mismo modo, el estar formado por múltiples cadenas cinemáticas brinda al mecanismo mayor rigidez que se traduce en un movimiento más controlado, por tanto, mucho más preciso y exacto en comparación a los robots seriales al eliminar de manera significativa el efecto de las fuerzas inerciales del propio cuerpo del robot [1], [3], [4], [5], [7].

Dadas las ventajas anteriores es que resulta interesante la construcción de una plataforma experimental de robot paralelo de seis grados de libertad con la que se puede explorar el funcionamiento de la misma, la cinemática detrás de los mecanismos paralelos, las singularidades en el espacio de trabajo, además de poder aplicar distintas técnicas para el control y análisis cinemático. Los robots paralelos comienzan a ser un punto importante en la industria y la academia floreciendo y generando nuevos descubrimientos y campos de aplicación de los robots [8], [9].

Algunos ejemplos de aplicación de los robots paralelos son los simuladores de vuelo y de conducción, los sistemas de alineación de objetos con precisión micro y nano métrica, los paletizadores y sistemas de montaje con velocidades sumamente altas en comparación a los robots seriales y finalmente los robots paralelos accionados por cables que se encargan de guiar a las cámaras en los estadios de futbol.

Dada la importancia y los amplios campos de aplicación de los robots paralelos, se considera de suma importancia su diseño, análisis y control por lo que en este trabajo se presenta el diseño y la construcción de un prototipo de robot paralelo de seis grados de libertad con configuración UPUR, cuyo propósito fundamental es el de proveer una plataforma experimental para introducir a estudiantes e investigadores en dicha área. Se muestran también resultados del espacio de trabajo alcanzable, así como el desarrollo de una interfaz gráfica para la operación del robot.

2. Diseño del robot paralelo

Un robot paralelo está constituido por dos plataformas, una fija y la otra móvil, unidas entre sí por múltiples cadenas cinemáticas simples, como se observa en la figura 1, las cadenas cinemáticas que conforman el robot también se denominan extremidades o piernas del robot [1], [3], [10].

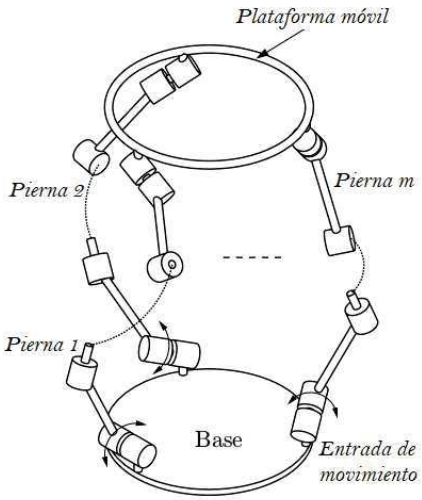


Figura 1. Componentes de un robot paralelo (adaptada de [3]).

De manera general, las características con las que debe cumplir el robot paralelo son las siguientes: seis extremidades de longitud variable, seis grados de libertad, de aplicación múltiple

permitiendo tareas posteriores como control de trayectorias y análisis cinemático y dinámico, entre otras.

2.1 Plataformas fija y móvil del robot.

De la bibliografía consultada [8], [11] se extraen algunas características con las que debe cumplir el robot, particularmente restricciones geométricas de las plataformas móvil y fija para simplificar el análisis cinemático, así como para evitar un excesivo número de singularidades en el espacio de trabajo o incluso una plataforma incontrolable.

La primera restricción que se tiene con respecto a las plataformas, es que deben de ser similares, es decir, de la misma forma pero escalada una de la otra, procurando que la plataforma fija sea la de mayor dimensión para brindar mayor estabilidad al sistema. Para el prototipo desarrollado se optó por plataformas con forma hexagonal regular escalando 1.5 veces la plataforma fija con respecto de la móvil. Una vez definida la forma hexagonal de las plataformas, se deben ubicar los puntos de conexión de las extremidades que no son más que los barrenos sobre cada una de las plataformas a partir de los cuales se sujetarán las extremidades. Otra restricción surge de estos puntos ya que no pueden colocarse en los vértices de los hexágonos en ambas plataformas debido a que se genera una plataforma incontrolable al ganar grados de libertad por singularidades, la forma ideal de conexión se muestra en la figura 2, donde se puede apreciar que en la base los puntos de conexión se colocan en los vértices mientras que en la plataforma móvil se colocan de modo que formen un triángulo, lo que supone que dos extremidades se fijan al mismo punto.

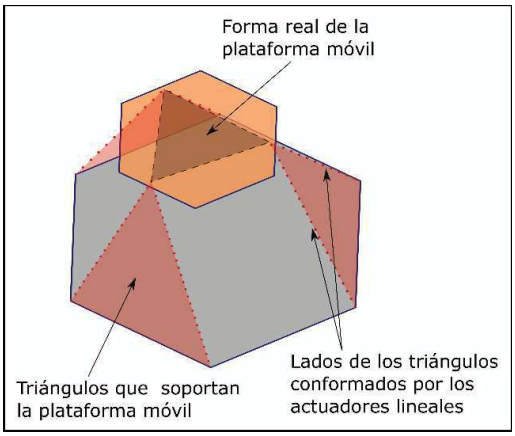


Figura 2. Ubicación ideal de los puntos de conexión.

Obtener la configuración mostrada en la figura 2 implica diseñar elementos que permitan la sujeción de dos extremidades a un mismo punto, además de permitir la conexión con la plataforma móvil, para evitar demasiados componentes en las extremidades, se opta por el diseño mostrado en la figura 3 en donde se puede apreciar un hexágono semirregular.

Los puntos de conexión en la plataforma móvil se colocan lo más cerca posible uno de otro formando el hexágono semirregular como se observa en la figura 3 tratando de emular lo más posible al triángulo ideal sin agregar demasiados elementos al diseño, la ubicación de los puntos de conexión es la siguiente:

Tabla 1. Localización de los puntos de conexión en las plataformas en mm.

B_1	[200,0,0]	P_1	[14.01,114.14, 0]
B_2	[100,173.2,0]	P_2	[-14.01,114.14, 0]

B_3	[-100,173.2,0]	P_3	[-105.85,-44.93, 0]
B_4	[-200,0,0]	P_4	[-91.84,-69.20, 0]
B_5	[-100,-173.2,0]	P_5	[91.84,-69.20, 0]
B_6	[100,-173.2,0]	P_6	[105.85,-44.93, 0]

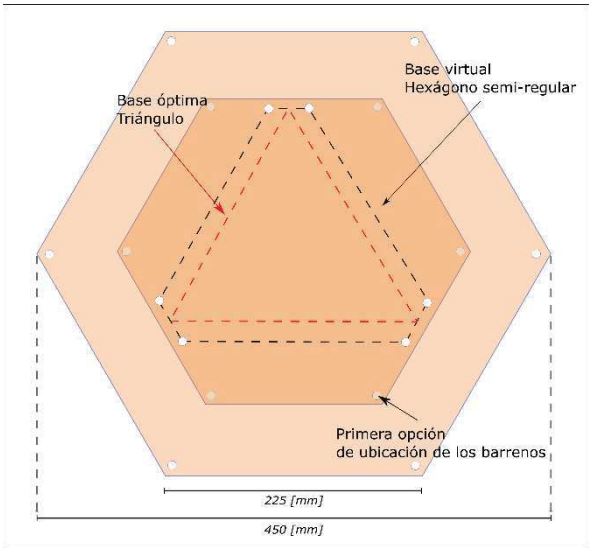


Figura 3. Ubicación de los puntos de conexión en el prototipo construido.

Una vez establecida la geometría de las plataformas y la ubicación de los puntos de conexión se continuó con la selección de la configuración adecuada para las extremidades del robot de modo que se cumplan los seis grados de libertad y el mínimo de elementos posibles en cada extremidad.

2.2 Selección de la configuración de las extremidades.

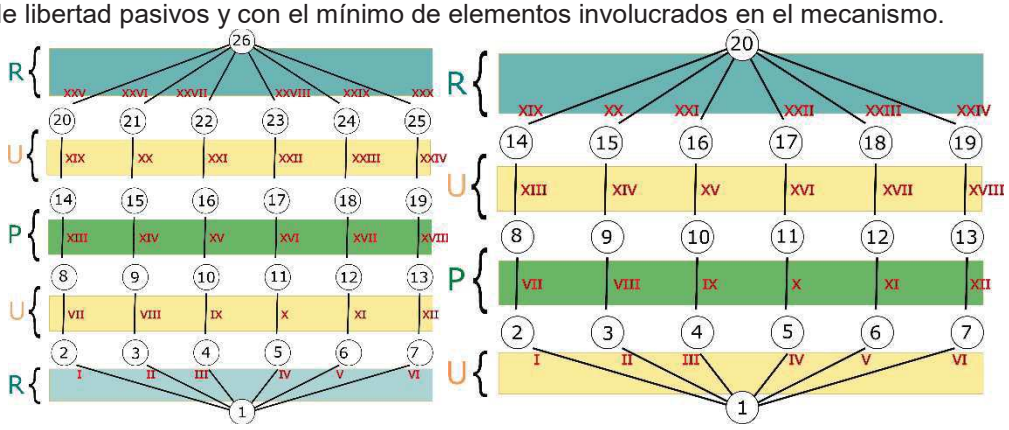
Para las extremidades se proponen tres configuraciones de las que se verifican los grados de libertad que permiten al mecanismo y la existencia o no de grados de libertad pasivos. Con ayuda de la fórmula de Chebyshev-Kutzbach-Grübler modificada (CKG), ecuación (1), se obtienen los grados de libertad de cada una de las configuraciones [12], [13].

$$F = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^{j} f_i - f_p \tag{1}$$

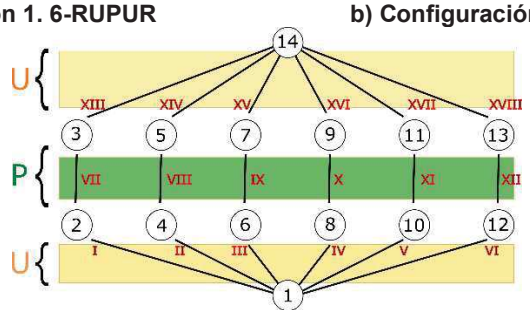
De la ecuación (1) se tiene que *F* corresponde a los grados de libertad del robot, *n* a los grados de libertad del espacio de trabajo (3 ó 6 dependiendo de si se trata de un movimiento planar o espacial, respectivamente), *j* a las juntas en el mecanismo, f_i a los grados de libertad permitidos por la junta i-ésima y finalmente f_p a los grados de libertad pasivos en el mecanismo.

Se presentan tres configuraciones, mostradas en las figura 4, se observa en cada una de las figuras el grafo correspondiente a cada configuración, se utiliza dicha representación para facilitar el conteo de los elementos y de las juntas, pues todos los nodos representan eslabones mientras que las líneas representan juntas y la letra a la izquierda de cada grupo de juntas indica el tipo, ya sea revoluta (R), prismática (P) o universal (U).

Comenzando con la configuración 1 (figura 4 a)), de la ecuación (1) se tienen un total de seis grados de libertad (GDL), pero se presentan seis grados de libertad pasivos y el número de elementos que componen al mecanismo es 26. Analizando la configuración 2 (figura 4 b)), se tiene que el mecanismo posee 6 GDL sin grados de libertad pasivos, con un total de 20 elementos que conforman al robot. Finalmente, la configuración 3 (figura 4 c)) presenta 0 GDL sin grados de libertad pasivos y con 14 elementos conformando al robot. De lo anterior se concluye que la mejor opción para conformar las extremidades resulta ser la configuración 2, permitiendo los seis grados de libertad sin grados de libertad pasivos y con el mínimo de elementos involucrados en el mecanismo.



a) Configuración 1. 6-RUPUR **b) Configuración 2. 6-UPUR**



c) Configuración 3. 6-UPU

Figura 4. Configuraciones propuestas para las extremidades.

Una vez establecida la configuración para las extremidades, se procede con la selección de los elementos mecánicos que representarán cada una de las juntas presentes en las extremidades, cada una de ellas consta de cuatro elementos como se observa en la figura 5.

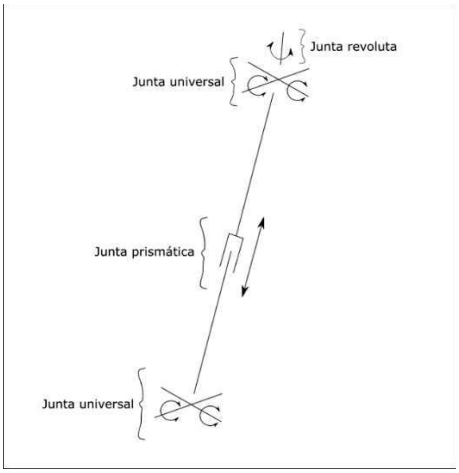


Figura 5. Dibujo esquemático de los componentes en las extremidades.

2.3 Elementos que componen las extremidades.

Para las juntas tipo U se eligen juntas universales de 20 mm maquinadas en aluminio. Algunas de las características principales de las juntas son: diámetro interior igual a 10mm, diámetro exterior igual a 20mm, distancia al centro de la junta Z_u igual a 21.5 mm. Se opta por estas juntas debido a su disponibilidad comercial y a la facilidad de reemplazo en caso de deterioro o de fallo. En la figura 6 se observa la junta universal seleccionada.

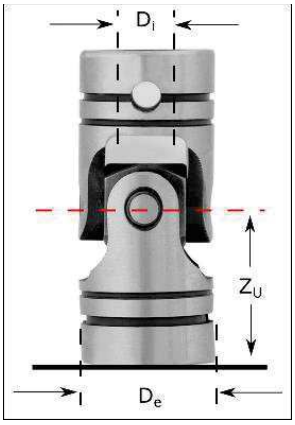


Figura 6. Junta universal utilizada en el robot.

Para la junta revoluta se opta por los rodamientos comerciales 607-Z de la marca KDYD bearings, esto debido a que los requerimientos de carga son mínimos y las dimensiones del rodamiento se adecuan con las dimensiones de las plataformas diseñadas. Algunas de las características de los rodamientos son: diámetro interior (d) igual a 7 mm, diámetro exterior (D) igual a 19 mm, 6.75 mm de espesor (B). La figura 7 muestra las características mencionadas de los rodamientos.

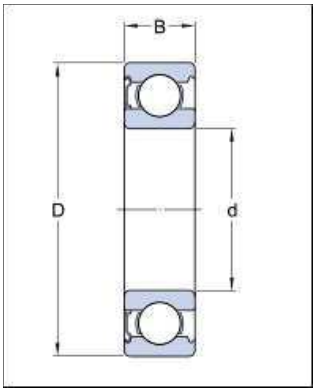


Figura 7. Diagrama esquemático del rodamiento 607-Z.

Se continúa con la definición de las juntas prismáticas en las extremidades, dado que esta es la entrada de movimiento se opta por utilizar servomotores lineales de modo que el control de la longitud del actuador no se convierta en un problema más por resolver, para este primer prototipo se consideran válidas todas las distancias de extensión solicitadas al actuador lineal. El servomotor seleccionado es el actuador lineal L-16R de la marca Actuonix (ver figura 8). Dentro de las características que ofrecen los motores se encuentran: una carrera de 140 mm, carga dinámica de 50 N, además de ser bastante compactos, operan con un voltaje de alimentación de 5V y como entrada de control reciben una señal PWM de 5V que varía su periodo entre 1000 us y 2000 us representando los estados totalmente retraído y totalmente extendido, respectivamente.

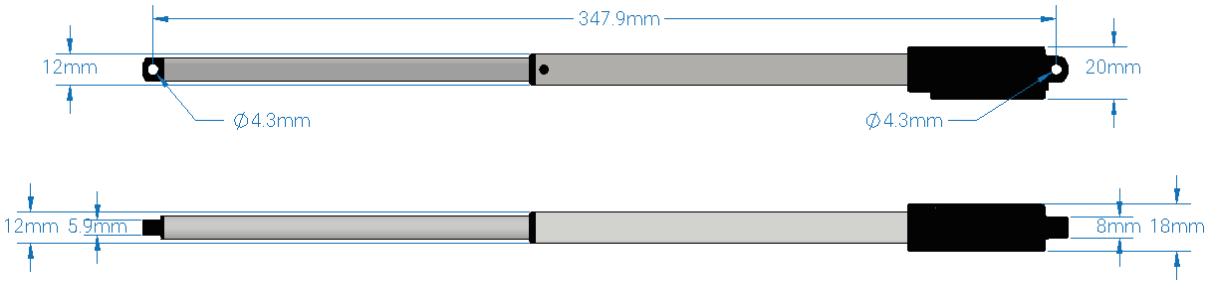
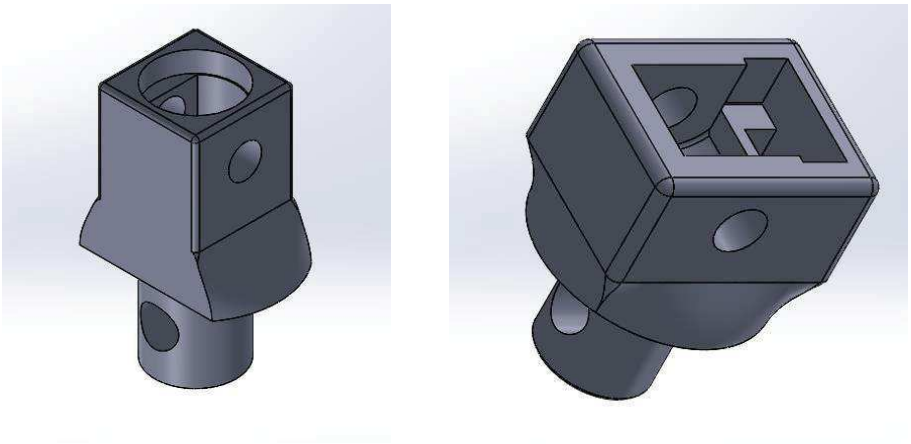


Figura 8. Dimensiones del actuador totalmente extendido.

Finalmente, se diseñaron un par de elementos de acoplamiento entre las juntas universales, el extremo del vástago del actuador y la base del mismo. Para el diseño de estos elementos se obtuvo el modelo CAD del actuador en Solidworks y se crearon moldes del extremo del vástago y la base para el interior de los elementos de acoplamiento, posteriormente se agregaron cilindros en las bases de los elementos de soporte para poder acoplarlos con las juntas universales. Los modelos para dichos elementos se pueden observar en la figura 9.



a) Elemento de acoplamiento superior b) Elemento de acoplamiento inferior

Figura 9. Elementos de acoplamiento diseñados en Solidworks.

Finalmente, la extremidad ensamblada se muestra en la figura 10 en donde se pueden observar las juntas universales en los extremos, seguidas de los elementos de acoplamiento y en el centro de estos elementos se encuentra el actuador lineal. Las juntas universales se sujetan a los elementos de acoplamiento a partir de pasadores y el elemento de acoplamiento al vástago del actuador a partir de un tornillo y una tuerca M4.

Figura 10. Extremidad ensamblada.

3. Manufactura del robot

Para la construcción del robot se requirió manufacturar los elementos que componen al robot, primero las plataformas móvil y fija y posteriormente los elementos de soporte y pasadores para sujetar las juntas universales, elementos de soporte y los actuadores.

Debido a que el robot construido no está diseñado para una tarea en particular, no se cuenta con requerimientos de fuerza o esfuerzos que debe soportar o restricciones de peso, entre otras características que permitan realizar un proceso de selección de materiales más detallado, por lo que tratando de reducir lo más posible el peso del prototipo sin afectar su resistencia, se elige Nylamid como materia prima, además el material resulta ser de fácil y rápido maquinado por lo que es una buena elección para fabricar las plataformas. Las plataformas se maquinan con ayuda de una fresadora CNC como se observa en la figura 11.

Figura 11. Maquinado de las plataformas en la fresadora CNC.

Para el caso de los elementos de soporte para los actuadores, se utilizó una impresora 3D bajo el principio de modelado por deposición fundida, por lo que el proceso resultó bastante simple, una vez obtenido el modelo CAD en Solidworks simplemente se exportó al software MPrint utilizado por la impresora y se comenzó con la impresión de las piezas. La impresora utilizada se observa en la figura 12.

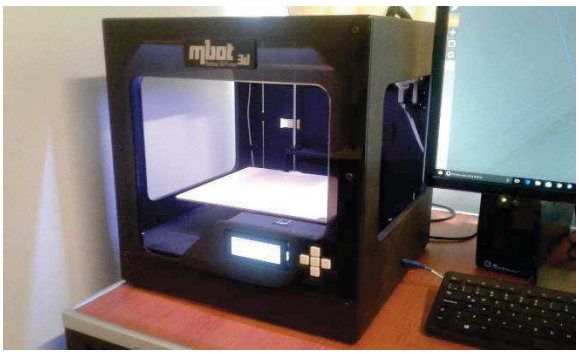


Figura 12. Impresora utilizada para fabricar las piezas de acoplamiento.

Para sujetar las juntas universales a ambas plataformas, fue necesario diseñar un par de pasadores. Para sujetar las juntas universales a la base móvil, los pasadores deben tener en uno de los extremos un barreno para que por él se coloque otro pasador transversal y se sujete con la junta universal, mientras que, para la base, debe tener una pequeña ranura para colocar seguros tipo E.
Como material para maquinar los pasadores se optó por acero A36, particularmente redondo de 3/8 in, debido a la fácil maquinabilidad del material en torno y a que los requerimientos de resistencia son mínimos. Finalmente, el robot terminado de ensamblar se muestra en la figura 13, donde se observa el prototipo real y el renderizado obtenido de Solidworks.

Figura 13. Robot construido y dibujo CAD renderizado.

4. Instrumentación del robot

Además del sistema mecánico descrito en la sección anterior, se requiere de la instrumentación y diseño del sistema electrónico y de control del robot, por lo que se propone un sistema que consta de cuatro módulos para operar el sistema con el que se podrá tener acceso a variables de posición y orientación de la plataforma móvil del robot, además se comunica con una computadora personal y se controla con un módulo independiente la extensión y retracción de los actuadores.
La estructura del sistema propuesto se observa en la figura 14 donde se pueden observar cuatro módulos, la computadora personal (PC), el módulo de control, el módulo de adquisición de datos y el módulo de control de los servomotores.

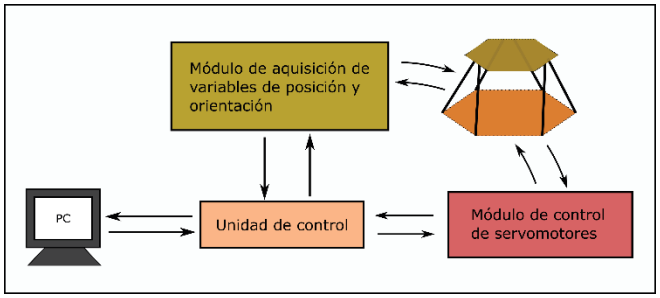


Figura 13. Módulos que componen el accionamiento del robot.

Cada módulo desempeña una actividad en específico como se describe a continuación:

- PC: Se encarga de procesar los datos de modo que envíe instrucciones al robot y reciba información respecto al estado del mismo.

- Unidad de control: Coordina la adquisición de datos y el control de los servomotores de modo que recibe las señales de la PC y se encarga de interpretarlas y dirigirlas al módulo correspondiente.

- Módulo de adquisición de datos: Genera las señales adecuadas para la extensión y retracción de los servomotores.
- Módulo de control de servomotores: Está constituido por el sensor de posición y orientación, básicamente es una unidad de medición inercial (IMU, por sus siglas en inglés).

4.1 Controlador pololu micromaestro 6

Cada uno de los servomotores requiere de una señal de modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) que varíe el ancho de pulso entre 1000 [us] y 2000 [us] pues estos límites se interpretan por el actuador como totalmente retraído y totalmente extendido respectivamente como se observa en la figura 14.

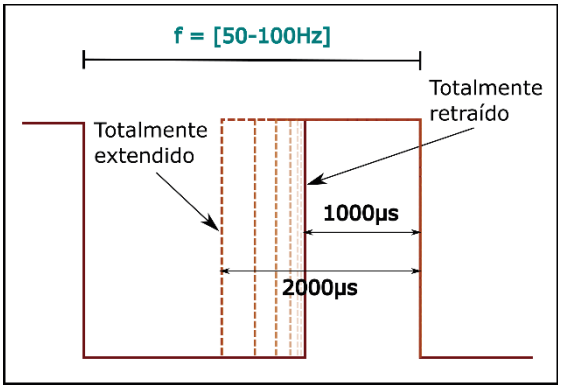


Figura 14. Características de la señal de control para los servomotores.

Por tanto, debido a que para el robot se requieren de seis extremidades, también se requieren de seis servomotores y seis señales de control. Se optó por utilizar el controlador micromaestro 6 de pololu, dado que las características que ofrece se adecúan a las necesidades del robot como se observa en la tabla 2.

Tabla 2. Características del controlador pololu.

Canales	6
Entradas analógicas	6
Entradas digitales	0
Ancho	2.16 cm
Largo	3.05 cm
Peso	3 g
Frecuencia	33-100 Hz
Ancho de pulso	64-3280 us
Tamaño del script	1 kB

Una vez seleccionado el controlador, se procede con la configuración del mismo que resulta bastante sencillo pues el fabricante proporciona una aplicación para configurar el dispositivo de una manera muy simple. La aplicación permite además, realizar una prueba rápida de los servomotores

conectados a la tarjeta, pero no es de interés para la configuración, las secciones importantes para la configuración se muestran en las figuras 15 y 16.

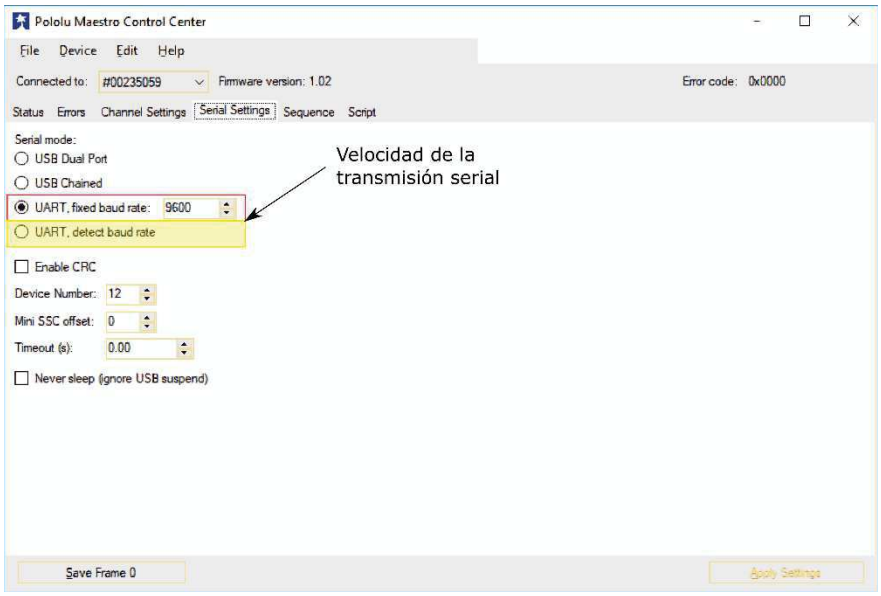


Figura 15. Configuración de la comunicación serial.

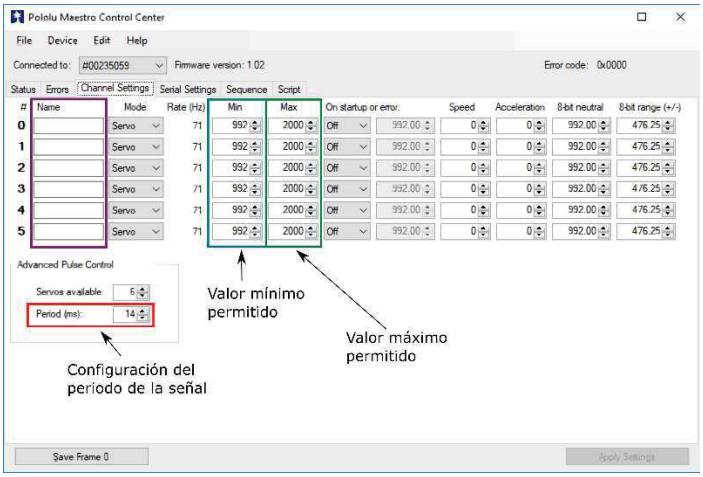


Figura 16. Ventana de configuración de la señal de control.

La tarjeta se comunicará con el módulo de control a partir de protocolo serial, por lo que se debe configurar la velocidad de transmisión del dispositivo, para esto, como se observa en la figura 15 basta con colocar en la casilla encerrada en color rojo la cantidad de bit por segundo, teniendo en cuenta que debe coincidir con la velocidad del dispositivo de control o en caso de no conocer la velocidad de transmisión seleccionar la opción sombreada en amarillo con la que el controlador determinará automáticamente la velocidad de transmisión, sin embargo no se garantiza un correcto funcionamiento bajo esta configuración.

Para configurar la señal de control, se modifica el límite inferior y superior del ancho de pulso de la señal en las secciones encerradas en azul y verde respectivamente, mostrado en la figura 16, de

igual manera se puede agregar una etiqueta para identificar cada canal modificando la sección encerrada en morado, mientras que la frecuencia de la señal se modifica en el recuadro en rojo.

En lo que respecta a las conexiones, en principio se usará solamente la conexión USB para configurar la comunicación y las características de los canales del controlador (procedimiento realizado anteriormente), una vez configurado, se conectarán en las dos terminales de alimentación para los servomotores una fuente de alimentación de 5 V y en cada uno de los tres pines consecutivos se conectarán cada uno de los servomotores. De igual manera se conectarán las terminales GND y VIN a la misma fuente de 5 V que alimenta los servomotores, mientras que las terminales TX y RX se conectarán a las terminales correspondientes de la unidad de control (ver figura 17).

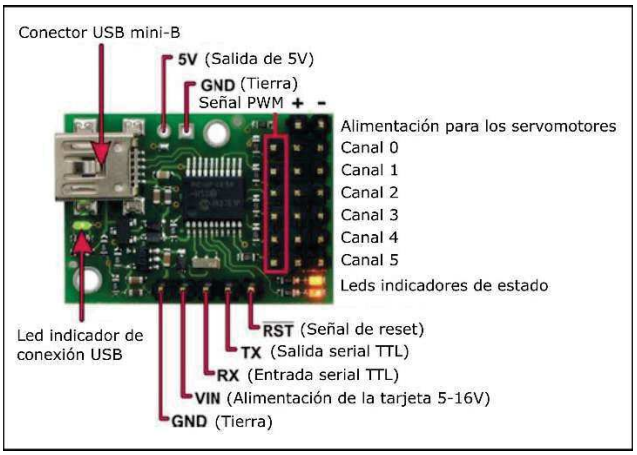


Figura 17. Pines del controlador de servomotores.

Una vez realizadas las conexiones solo falta integrar el módulo a la unidad de control y al sistema en general.

4.2 Sensor LSM9DS1

Para obtener las variables de orientación del robot se utilizó la unidad de medición inercial (IMU) que posee nueve grados de libertad lo que se traduce en tres dispositivos integrados en la tarjeta, un acelerómetro, un giroscopio y un magnetómetro todos capaces de medir en las tres direcciones del sistema coordenado X, Y y Z, de ahí los nueve grados de libertad.

Se aprovechará la versatilidad en comunicación que ofrece el dispositivo al soportar el protocolo I2C de modo que los únicos cuatro pines a utilizar del sensor serán los sombreados en amarillo en la figura 18. Conectando la terminal GND a la tierra de la unidad de control, mientras que la terminal VDD se deberá conectar a una fuente de alimentación que no sobrepase los 3.6 [V], para finalmente conectar las terminales SDA y SCL a los respectivos pines en la unidad de control de modo que se comuniquen a partir del protocolo I2C.

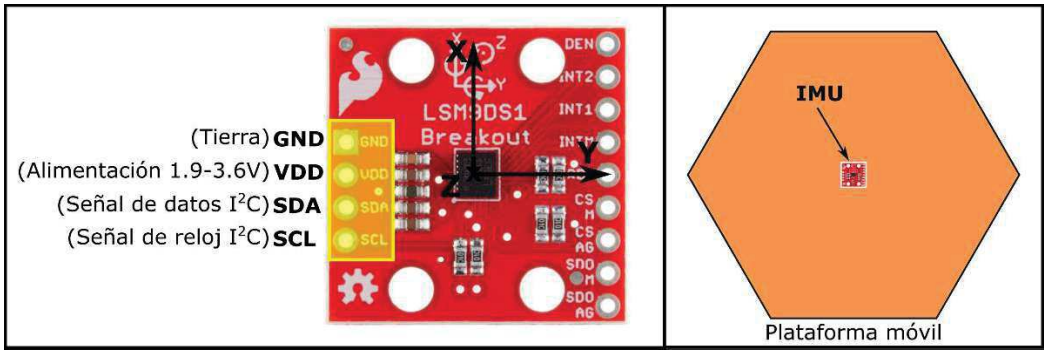
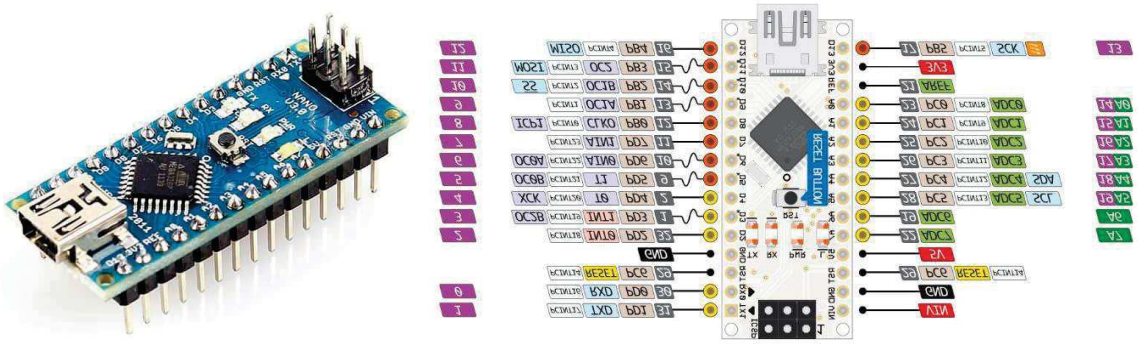


Figura 18. Pines y colocación de la tarjeta en la plataforma móvil.

4.3 Integración de los módulos a partir de una tarjeta ArduinoNANO

Para integrar los módulos anteriores se requiere de una unidad de control, como se observa en la figura 13, por lo que se opta por una de las tarjetas de desarrollo de arduino para fungir como unidad de control, esto debido a que, para ambos dispositivos, el sensor y el controlador existen librerías que permiten operarlos con mayor versatilidad en comparación con el uso un microcontrolador y acceder a cada uno de los registros de las tarjetas. De las múltiples tarjetas que ofrece Arduino se selecciona la versión NANO (ver figura 19) debido al tamaño compacto y las características que ofrece.



a) Tarjeta ArduinoNANO **b) Funciones de cada uno de los pines de la tarjeta**

Figura 19. Tarjeta ArduinoNANO y funcionalidad de sus pines.

Dentro de las características importantes se encuentran tres protocolos de comunicación disponibles: USART, I2C y SPI, que se refieren a la comunicación serial, al protocolo por dos líneas I2C y al puerto para interfaz serial (SPI). De las cuales se usarán la USART para comunicar con el controlador de los motores y el protocolo I2C para comunicar con la IMU, de modo que se pueda acceder a ambos dispositivos simultáneamente. Además de lo anterior, la tarjeta ofrece una terminal que genera una salida de 3.3V con la que se puede alimentar la IMU y salidas de 5V para alimentar el controlador de motores.

Finalmente, se puede observar en la figura 20 un esquema general de conexiones y cada elemento que se sustituye por cada uno de los módulos del sistema.

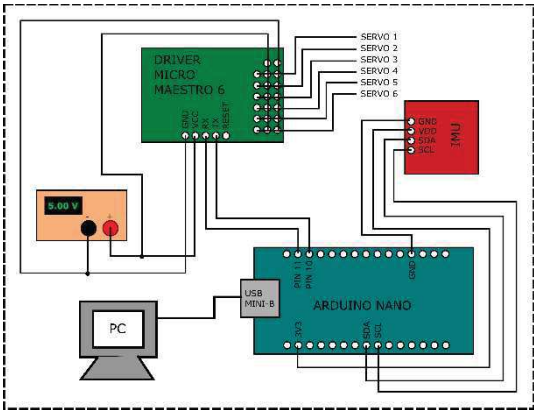


Figura 20. Esquema general del sistema y sus conexiones.

4.4 Interfaz de operación

Para poder accionar el robot de una manera más sencilla e intuitiva se desarrolló una interfaz con la que se controla la orientación y posición de la plataforma móvil.

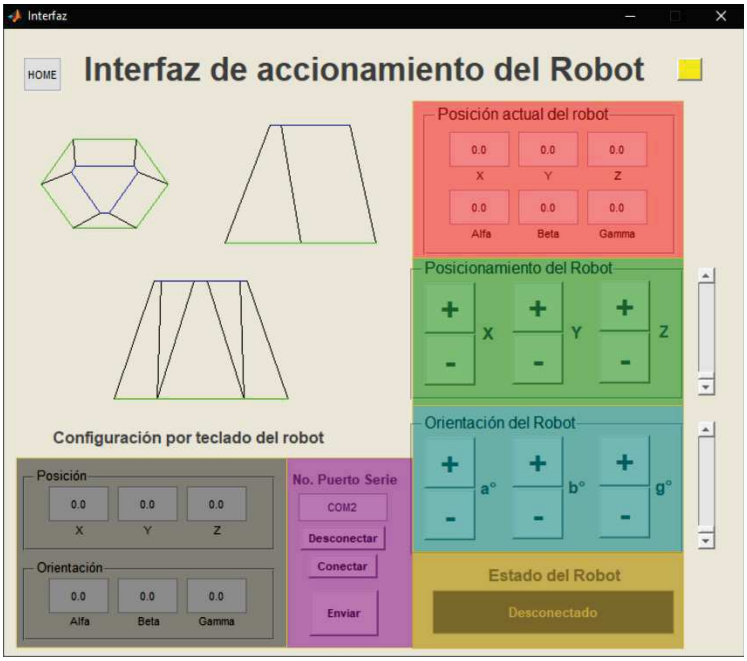


Figura 21. Interfaz desarrollada para operar el robot.

La interfaz consta de siete paneles principales, como se muestra en la figura 21 cada una sombreada de un color distinto, cada panel se describe a continuación:

- Posición actual del robot: Describe la posición y orientación actual del robot, dichos datos son leídos desde la IMU y desplegadas en la interfaz con cada envío de datos. Se despliegan las coordenadas en X, Y y Z y los ángulos correspondientes a yaw, pitch y roll (coloreada de rojo).

- Posicionamiento del robot (x, y, z): Permite modificar la posición en X, Y y Z del robot a partir de los botones más y menos, incrementando y decrementando la posición actual respectivamente. Además, con la barra de desplazamiento a la derecha se aumenta el paso de los incrementos, en lugar de incrementar de uno en uno, generar incrementos de diez en diez incrementando así sucesivamente entre más arriba se ubique la barra de desplazamiento (coloreado de verde).

- Orientación del robot: Permite modificar los ángulos correspondientes a los ángulos de Euler, de igual manera que la posición se incrementa y decrementa con los botones más y menos respectivamente, y de igual manera aumentar el paso de incrementos al mover la barra de desplazamiento a la derecha (coloreado de azul).

- Estado del robot: Indica el estado en el que se encuentra el robot, es decir, si se encuentra conectado a la PC o no, si la última posición es alcanzable o no, todo se muestra en el recuadro en negro (coloreado de amarillo).

- Conexión del robot al puerto serie: Permite conectar el robot a la PC a partir del puerto serie asignado al arduino NANO, se recomienda revisar el número en el administrador de dispositivos y colocarlo en la casilla en lugar de COM2. Finalmente, el tercer botón con la etiqueta Enviar envía los valores capturados en las casillas a la izquierda de modo que el robot alcanza dicha posición si se encuentra dentro del espacio de trabajo (coloreado de morado).

- Posición y orientación ingresada por teclado: Permite ingresar alguna posición precisa a la que se desea llevar la plataforma del robot, las tres casillas superiores corresponden a la posición y las tres inferiores a la orientación, nuevamente los ángulos se reeren a los ángulos de Euler utilizados durante todo el trabajo. Finalmente, con el botón enviar descrito en el punto anterior, se envían los valores y el robot se moverá o no dependiendo de si la posición es alcanzable o no (coloreado de negro).

- NOTA: Se recomienda tener cuidado con posiciones muy alejadas unas de otras pues debido a que no se tiene control de la velocidad de accionamiento de los actuadores puede llegar a encontrarse en puntos singulares y desestabilizar el movimiento del robot.

- Vista preliminar de la pose del robot: Obtiene de manera gráfica una pose estimada del robot en el espacio de trabajo (se representa en la gráfica en la esquina superior izquierda).

5. Conclusiones

De la realización del proyecto se obtuvo un prototipo de robot paralelo de seis grados de libertad con configuración UPUR del que se pueden obtener diversos resultados de análisis cinemático, análisis dinámico, seguimiento de trayectorias, entre otras. Se dispone también de la interfaz de operación que permite un acercamiento más sencillo e intuitivo a la operación del robot al poder operarse de manera gráfica y con la inserción de poses del robot a partir del teclado.

La plataforma se puede mejorar al realizar circuitos de control propios para los servomotores, es decir, desacoplarlos del sistema de control que tienen de fábrica y accionarlos con un circuito propio, la tarea no resulta tan complicada pues los motores tienen las dos terminales para la alimentación y además un potenciómetro acoplado para medir el desplazamiento de los mismos con el que fácilmente se puede retroalimentar cualquier circuito de control.

El sistema mecatrónico desarrollado permitirá un acercamiento experimental a los robots paralelos para tareas de enseñanza e investigación a los estudiantes de Ingeniería Mecatrónica y de la Maestría en Robótica de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, con lo que se pretende estimular

el desarrollo de una línea de investigación orientada al diseño, análisis y control de plataformas robóticas paralelas.

Referencias

[1] D. Taghirad H. "*Parallel robots mechanics and control",* CRC Press, EE. UU., Primera edición, 2013.
[2] Spong W., Hutchinson S., Vidyasagar M. *"Robot modelling and control"*, John Wiley & Sons, EE. UU., Primera edición, 2005.
[3] Merlet J.P., *"Parallel robots",* Springer, Holanda, Segunda edición, 2006.
[4] Gallardo J. *"Kinematic análisis of parallel manipulators by algebraic screw theory",* Springer, México, Primera edición, 2016.
[5] Zhang Dan, *"Parallel robotic machine tools",* Springer, EE. UU., Primera edición, 2010.
[6] Gogu G. *"Structural synthesis of parallel robots",* Springer, Holanda, Primera edición, 2008.
[7] Zhang D., Wei B. *"Dynamic balancing of mechanisms and synthesizing of parallel robots"*, Springer, Suiza, 2016.
[8] Fitcher E. *"A Stewart platform-based manipulator: general theory and practical construction"*, The International Journal of Robotics Research, SAGE, Vol.5, No. 2, 157-182 pp., 1986.
[9] Gosselin C., Parenti-Castelli V., Pierrot F. *"Fundamental issues and new trends in parallel mechanisms and manipulators"*, Meccanica, Springer, Vol. 46, No. 1, 1p, 2011.
[10] Kong X., Gosselin C. *"Type synthesis of parallel mechanisms"*, Springer, EE. UU., Primer edición, 2007.
[11] Wei Y., Li Q., Chai X. *"New family of 3-DOF up-equivalent parallel mechanisms with high rotational capability"*, Chinese Journal of Mechanical Engineering, Springer, Vol. 31, 1-12 pp., 2018.
[12] Lenarcic J., Roth B. *"Advanced in robot kinematics"*, Springer, EE. UU., Primera edición, 2006.
[13] Lynch K, Park F. *"Modern robotics"*, Cambridge University Press, Cambridge, Primera edición, 2017.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 36, pp.445 – 456, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Simulación de Desplazamientos Debidos a la Dilatación Térmica en una Estufa Domestica

Cortés Rodríguez Luis Gabriel, Ortega Vivas Cesar Adolfo ([1]), y Bedolla Hernández Jorge

Instituto Tecnológico de Apizaco, Av. Instituto Tecnológico s/n, Apizaco, Tlaxcala, México
(1) Mabe TyP, Av. 5 de febrero Acceso B #406, Parque Industrial Jurica, Querétaro, México
Correo electrónico para contacto: luis_g_10@hotmail.com

Resumen

En el presente trabajo se expone el desarrollo de simulaciones de distribución de temperaturas y análisis estructural basados en el método de elemento finito de una estufa cuyo centro de horno alcanza 410 °C y la cual presenta desplazamientos debidos a la dilatación térmica en zonas donde el funcionamiento de la puerta de horno se ve afectado provocando que se desplace. La finalidad de las simulaciones es la de observar el comportamiento de la estufa cuando varios de sus componentes se desplazan debido a las altas temperaturas a la que están expuestos y a partir de los resultados de las simulaciones se proponen cambios en geometrías para direccionar los desplazamientos a zonas donde la dilatación térmica no afecta el comportamiento de la puerta del horno.

Palabras clave: Dilatación térmica, método de elemento finito.

1. Introducción

La dilatación térmica es el incremento de la longitud de un material debido al aumento de temperatura, esto origina una mayor vibración térmica de los átomos del material y un aumento de la distancia media de separación entre átomos adyacentes. Si la temperatura aumenta, el material se dilata, mientras que, si la temperatura disminuye, el material se contrae [1]. Al dilatarse o contraerse un material se presentan esfuerzos. Al presentarse un cambio de temperatura en un material, este experimentara una deformación axial llamada deformación térmica. Si la deformación es controlada, no se presenta deformación, pero si esfuerzos térmicos. Los esfuerzos térmicos se producen cuando en una estructura hiperestática los desplazamientos térmicos están restringidos por soportes, a diferencia de una estructura estáticamente determinada que tiene la libertad de dilatarse o contraerse cuando experimenta un cambio de temperatura [1]. Este fenómeno es importante considerar cuando se diseña o construyen determinadas estructuras.

El método de elemento finito es un método numérico que busca la solución de la distribución de las variables de campo en el dominio del problema que es difícil de obtener analíticamente. Se realiza dividiendo el dominio del problema en varios elementos [2].

Las simulaciones en computadora son ampliamente utilizadas para hacer análisis, desarrollar o mejorar productos y proyectos. La mayoría de estos análisis se llevan a cabo mediante uso de softwares que utilizan el Método de Elemento Finito. Básicamente el método consiste en dividir en partes pequeñas la geometría de una pieza sometida a cargas y restricciones, estas divisiones son llamadas elementos. La división de la geometría en pequeños elementos resuelve un problema complejo, al subdividirlo en problemas más simples, lo que permite a la computadora hacer las tareas con eficiencia.

Los elementos pueden ser triangulares o cuadrados dependiendo de la complejidad de la geometría o del análisis que se haga. Las conexiones de los elementos son llamadas nodos, y al conjunto de nodos y elementos se le conoce como malla. La precisión de este método depende de la cantidad de nodos y elementos, del tamaño y de los tipos de elementos de la malla. Por lo tanto, cuanto menor sea el tamaño y mayor el número de elementos en una malla, más precisos serán los resultados del análisis.

El presente trabajo se basa en lo anterior aplicándolo en un modelo de estufa que tiene un modo de funcionamiento que consiste en calentar el centro del horno a 410 °C durante un periodo de 4 horas, esto hace que algunas piezas sufran una expansión térmica y que la puerta de horno se desplace. Se realizaron simulaciones en el software Hyperworks de distribución de temperaturas tomando los datos reales de la temperatura obtenida de diferentes puntos de la estufa por medio de termopares.

Los valores de temperatura se utilizaron como cargas térmicas para realizar análisis estructurales para observar el comportamiento de la estufa.

2. Medición de temperaturas en estufa

Se hicieron mediciones de temperatura conectando termopares en diferentes puntos de la contrapuerta, del marco y cavidad del horno, con la finalidad de conocer que partes se calientan más y para que los datos sirvieran como cargas para hacer análisis de elemento finito de distribución de temperaturas y análisis estructural. Los puntos en donde se realizaron las mediciones de temperatura son los siguientes:

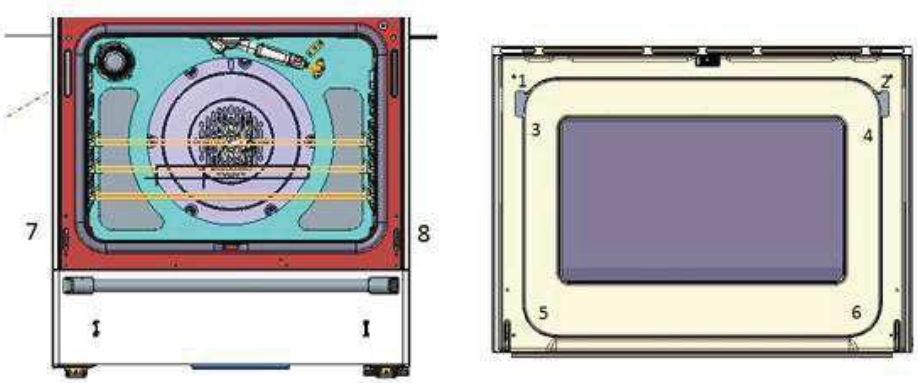


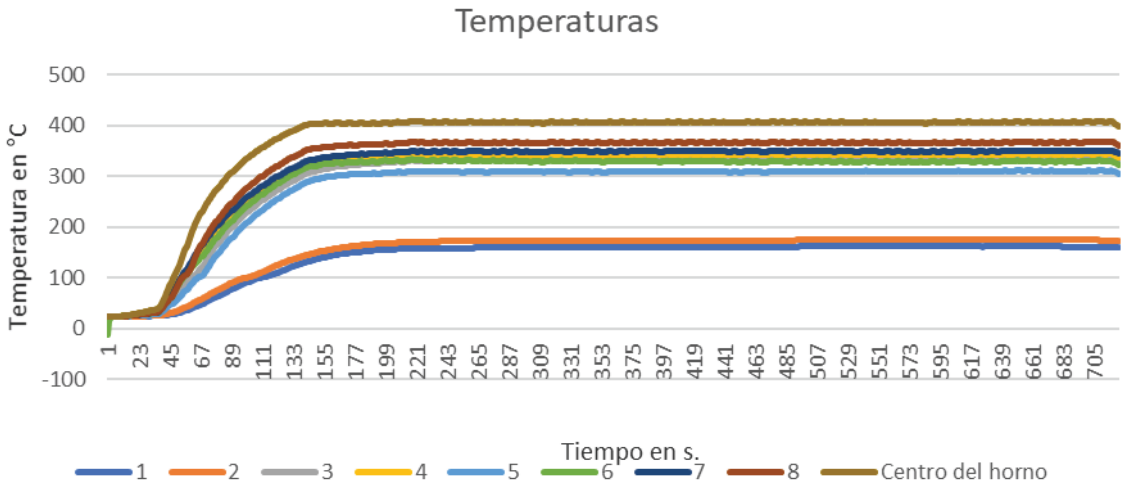
Figura 1. Partes de la estufa donde se conectaron termopares

Para esta simulación solo se utilizaron los datos obtenidos de los termopares conectados en el marco y en la cavidad del horno.
En la figura 2 se muestran los termopares conectados a la estufa.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 36, pp.445 – 456, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Figura 2. Termopares conectados a la estufa

En la siguiente grafica se muestran las curvas de temperatura de los diferentes puntos de la estufa obtenidas de los termopares durante el periodo de 4 horas.



Grafica 1. Curvas de temperaturas obtenidas de los termopares

3. Desarrollo de las simulaciones

El método de elementos finitos es una técnica ampliamente utilizada para simular sólidos deformables. El método de elementos finitos (FEM) es una técnica de computadora para resolver ecuaciones diferenciales parciales. Una aplicación es predecir los campos de deformación y tensión dentro de cuerpos sólidos sometidos a fuerzas externas, también se puede utilizar para resolver problemas relacionados con el flujo de fluidos, la transferencia de calor, los campos

electromagnéticos, la difusión y muchos otros fenómenos. El objetivo principal del método de elementos finitos basado en el desplazamiento es calcular el campo de desplazamiento dentro de un sólido sometido a fuerzas externas [3]. Para hacer un análisis de elemento finito debe especificarse lo siguiente:

1. La geometría del sólido. Esto se hace generando una malla de elementos finitos para el sólido.
2. Las propiedades del material. Esto se hace especificando una ley constitutiva para el sólido.
3. La naturaleza de la carga aplicada al sólido. Esto se hace especificando las condiciones de frontera para el problema.
4. Si el análisis implica el contacto entre dos o más sólidos, deberá especificar las superficies que entren en contacto y las propiedades del contacto.
5. Para un análisis dinámico, es necesario especificar condiciones iniciales para el problema. Esto no es necesario para un análisis estático.
6. Para problemas relacionados con campos adicionales, es posible que deba especificar valores iniciales para estas variables de campo.
7. Para un análisis estático, se debe especificar si es un análisis lineal o no lineal

Se realizaron las simulaciones usando el software Hyperworks. Hyperworks es un programa de análisis y simulación CAE para ingeniería desarrollado por Altair Engineering, la aplicación permite diseñar y crear productos en 3D. Para llevar a cabo el preproceso del análisis se utilizó la herramienta Hypermesh. Altair HyperMesh es un preprocesador de elementos finitos de alto rendimiento que proporciona un entorno visual altamente interactivo para analizar el rendimiento del diseño de un producto.

A continuación, se muestra cómo se desarrolló la simulación:

1. Importar geometría

Lo primero que se llevó a cabo para realizar la simulación fue importar las geometrías de los componentes que conforman la estufa. En la figura 3 se muestran los componentes realizados en un software de CAD los cuales fueron importados al software Hypermesh en formato STEP para proceder a realizar el mallado.

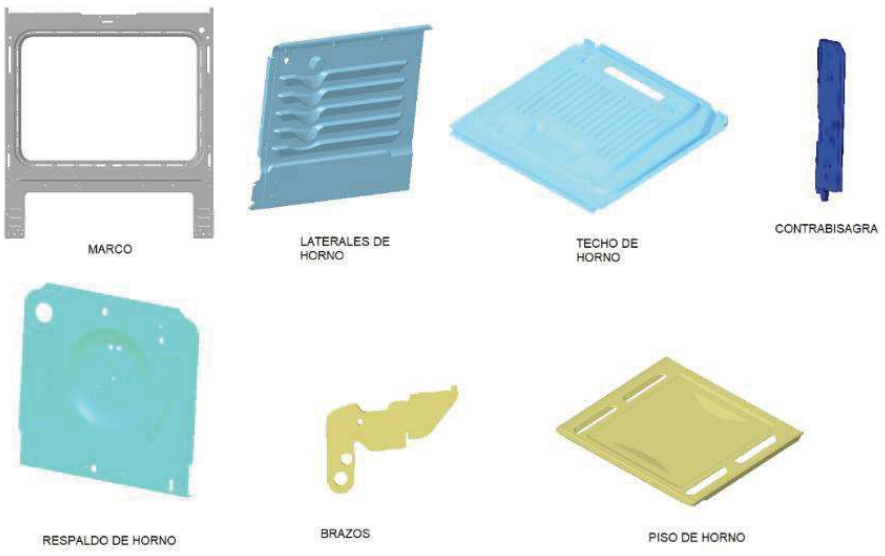


Figura 3. Componentes para las simulaciones

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 36, pp.445 – 456, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Se definió el contacto entre los componentes y se realizó el ensamble quedando como se muestra en la figura 4. Se puede observar la cavidad del horno y el marco frontal de la estufa, que para el objetivo de este trabajo son los componentes a analizar.

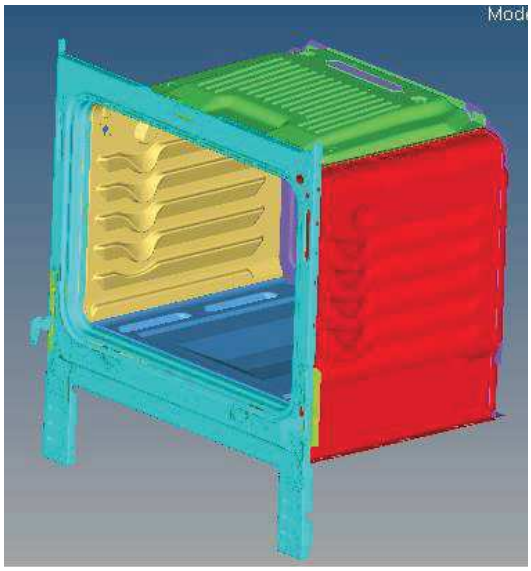


Figura 4. Ensamble de los componentes

2. Mallar

Una vez quedado listo el ensamble se procedió a mallar. En la figura 5 se muestra la malla en el ensamble, los elementos son cuadrados y triángulos, posteriormente se revisa que la calidad de la malla sea buena y que cumpla con la condición de que los elementos sean lo más cuadrados posibles y que los triángulos sean equiláteros, si no fuera el caso se procede a corregirlos.

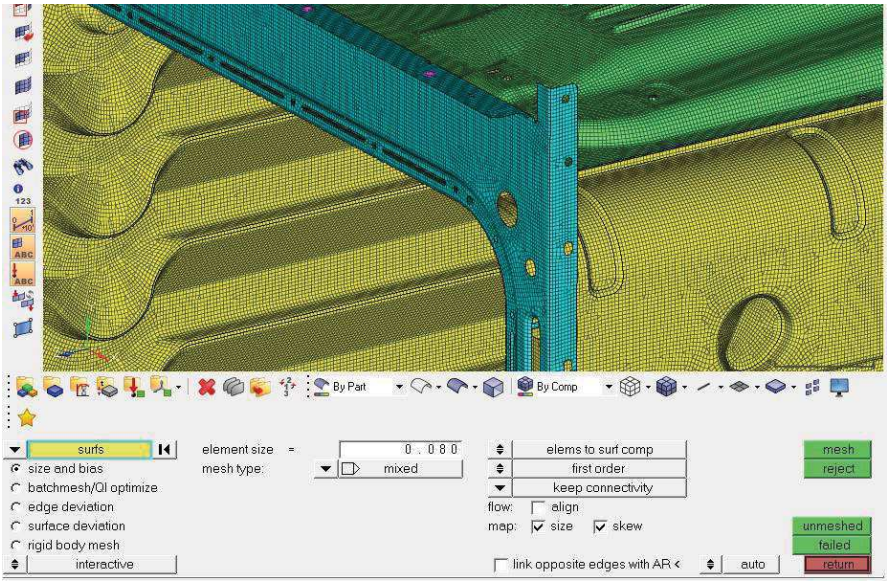


Figura 5. Mallado de los componentes

3. Crear material

El siguiente paso es el de crear el material de los componentes. En la figura 6 se muestra el menú principal donde se puede crear un material.

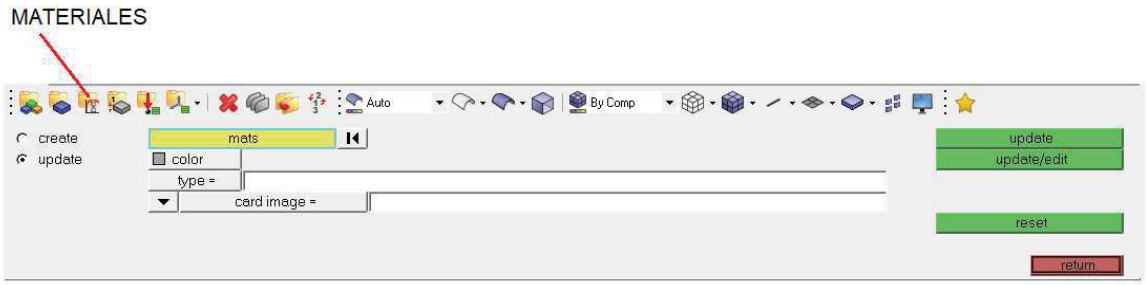


Figura 6. Panel de materiales

4. Crear propiedades

Una vez creado el material se le debe asignar las propiedades. En la figura 7 se muestra el panel de propiedades.

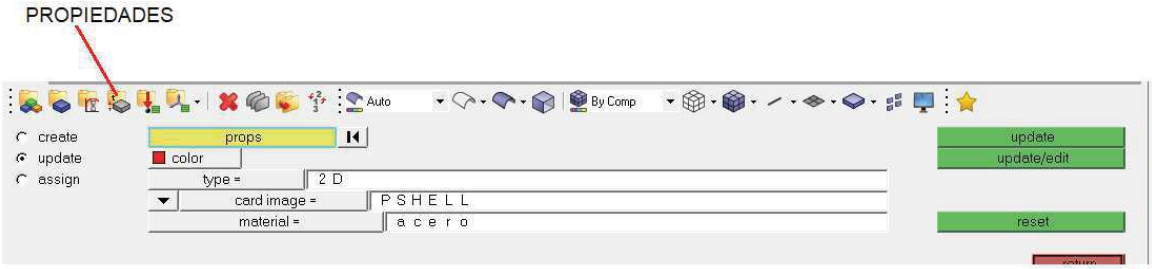


Figura 7. Panel de propiedades

5. Asignar propiedades y material a los componentes

Cuando ya se ha creado el material y sus propiedades se deben de asignar a los componentes que le correspondan.

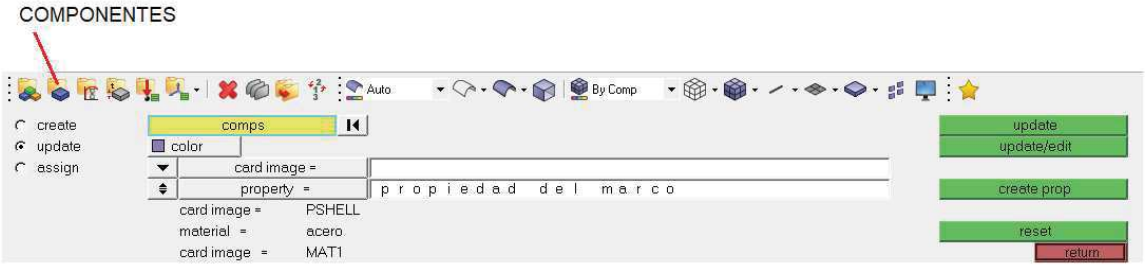


Figura 8. Panel de componentes

6. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera se utilizan para especificar la carga aplicada a un sólido. En esta simulación la carga es térmica para el análisis de distribución de temperaturas y posteriormente esa carga térmica es utilizada para hacer un análisis estructural.
Además, se aplicó una fuerza de 34 libras sobre los brazos de la bisagra la cual corresponde al peso de la puerta del horno.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 36, pp.445 – 456, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

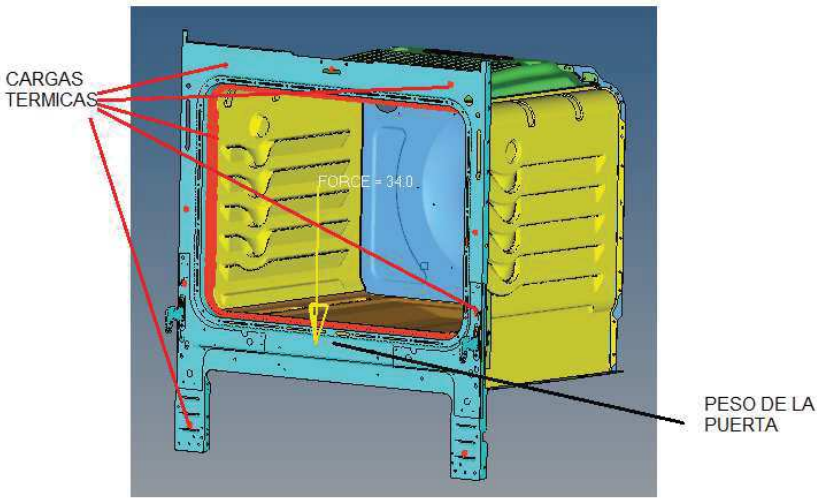


Figura 9. Cargas en la simulación

Y se colocaron restricciones de movimiento en las partes donde físicamente la estufa esta atornillada a la estructura y no puede moverse.

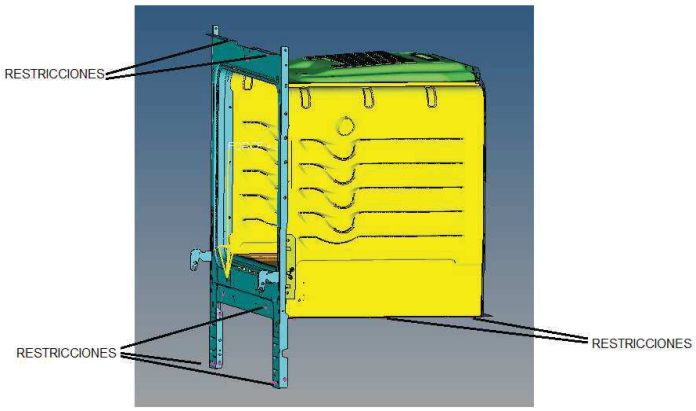


Figura 10. Restricciones

7. Paso de carga

Cuando se configura un modelo de elementos finitos, generalmente se aplica la carga en una serie de pasos. Puede definir diferentes condiciones de frontera en cada paso. A menos que especifique lo contrario, las cargas variarán linealmente desde sus valores al comienzo del paso hasta sus valores al final del paso. En un análisis no lineal, la solución puede no converger si la carga se aplica en un solo incremento. Si este es el caso, la carga debe aplicarse gradualmente, en una serie de incrementos más pequeños. En esta simulación se aplicaron dos pasos de carga, la de distribución de temperatura y la del análisis estructural.

Figura 11. Pasos de carga en la simulación

8. Run

Una vez listo el preproceso se ejecuta el programa, en este caso con el software Optistruct. Altair OptiStruct es un solver de análisis estructural para problemas lineales y no lineales bajo cargas estáticas y dinámicas

4. Resultados

En la simulación se utilizó el sistema internacional de unidades, por lo que los resultados de las temperaturas se cambiaron de grados Celsius a Fahrenheit.
Las temperaturas en el marco son las siguientes:

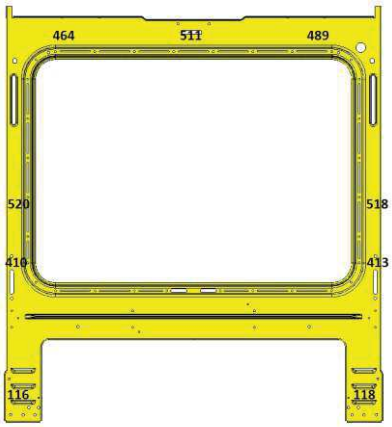


Figura 12. Temperaturas en el marco

Estos son los datos que se utilizaron para la distribución de temperaturas, de acuerdo con el desarrollo de las simulaciones que se explicó en la sección 3, el análisis de distribución de temperaturas en el marco quedó de la siguiente manera:

Figura 13. Distribución de temperaturas en el marco

La distribución de temperaturas en el horno y en el marco se muestran en la figura 14. Se observa como la mayor temperatura se concentra en toda la cavidad del horno, en el marco la temperatura tiende a disminuir en la parte de abajo.

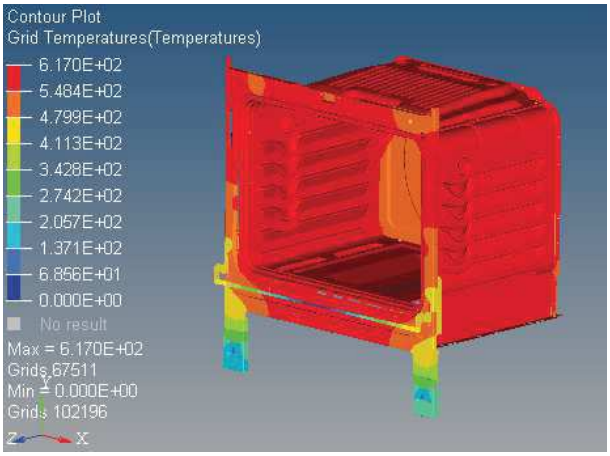


Figura 14. Distribución de temperatura en el marco y en el horno.

Estas cargas de temperatura se utilizaron para hacer el análisis estructural, la finalidad del análisis estructural es la de observar el comportamiento de los componentes de la estufa cuando son sometidos a altas temperaturas, cómo es que se deforma debido a la dilatación térmica y cómo se desplazan, y encontrar la razón de que la puerta del horno se desplace.
El resultado del análisis estructural permitió definir cuál es el componente que provoca que la puerta del horno se desplace. Físicamente se observó que la bisagra presenta un desplazamiento en dirección Z positivo, esto es debido a que están ensambladas al marco, y el marco es el componente que provoca el desplazamiento de la puerta, por lo tanto, al deformarse el marco, este desplaza a las bisagras y estas a su vez al estar ensambladas a la puerta del horno tienden a empujarla. En la figura 15 se muestra la comparación en el desplazamiento real de las bisagras y de la puerta del horno con el desplazamiento de las bisagras en la simulación. La simulación concuerda con el comportamiento real de la estufa.

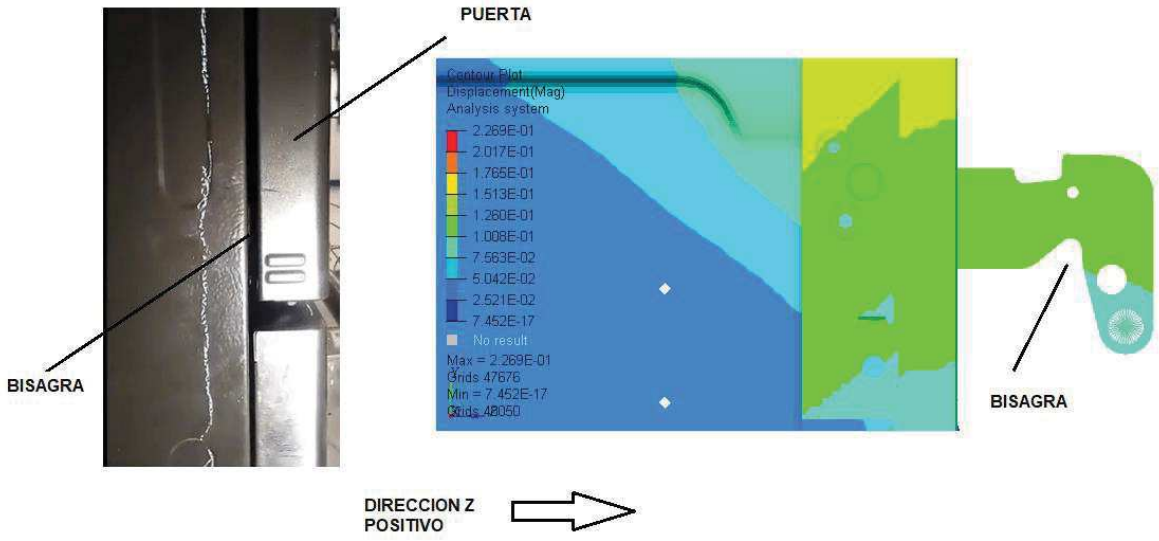


Figura 15. Desplazamiento real de la puerta del horno y desplazamiento de la bisagra en la simulación

En base a los resultados obtenidos en esta simulación se procedió a proponer soluciones para evitar que la puerta del horno se siguiera desplazando.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 36, pp.445 – 456, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

La dilatación térmica es una propiedad física de los materiales, y por lo tanto no puede ser eliminada, pero, en la práctica se descubrió que cambiando ciertas geometrías en la estructura del marco se pueden direccionar los esfuerzos y las deformaciones hacia zonas en donde dichos esfuerzos y desplazamientos no afectan el funcionamiento de la puerta.
En base a esto se plantearon dos propuestas de geometrías para direccionar los desplazamientos.

Propuesta 1

En esta primera propuesta en la simulación se realizaron dos embutidos con la finalidad de que absorban los desplazamientos de la parte central del marco para que no los dejen pasar hacia la zona de la bisagra. Los embutidos son formas en laminas metálicas y pueden aumentar la rigidez en la estructura, pero según lo observado en las simulaciones, también pueden absorber los esfuerzos y los desplazamientos. El embutido propuesto en la parte central del marco se muestra en la figura 16.

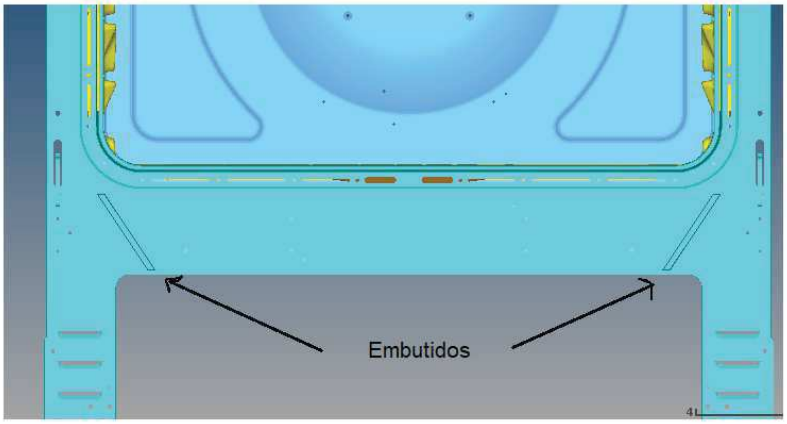


Figura 16. Embutidos de primera propuesta.

En la figura 17 se observa mas detallado el embutido, la funcion de este embutido es la de absorber los desplazamientos de la parte central del marco para que no afecte a la zona de las bisagras, podemos hacer la comparacion con la de un acordeon, en la que el embutido se dobla para absorber los desplazamientos.

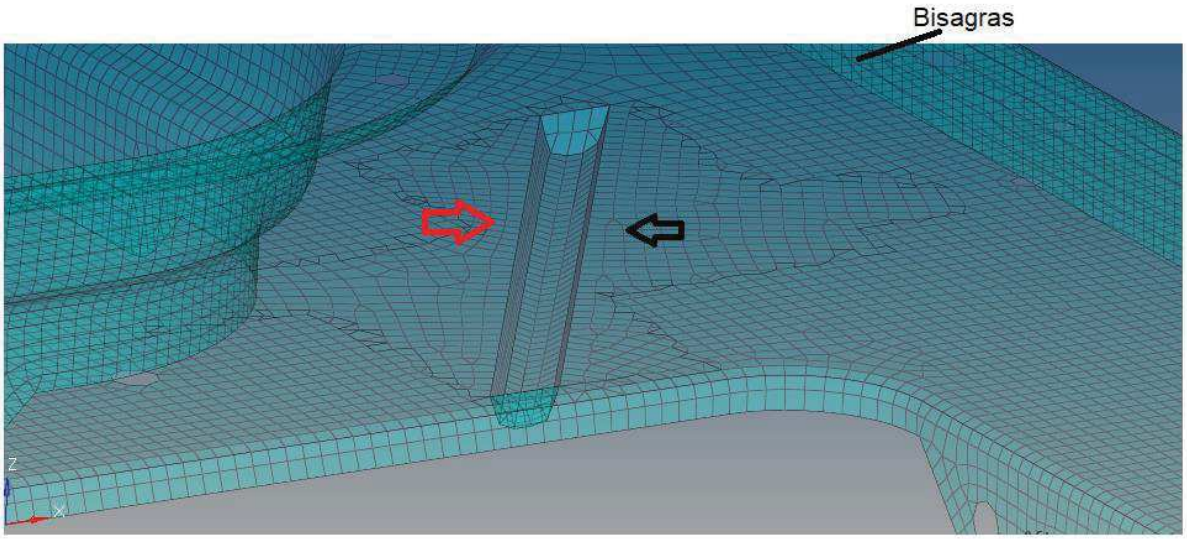


Figura 17. Embutido

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 36, pp.445 – 456, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Propuesta 2

En este caso se propusieron las siguientes geometrías en la parte central del marco.

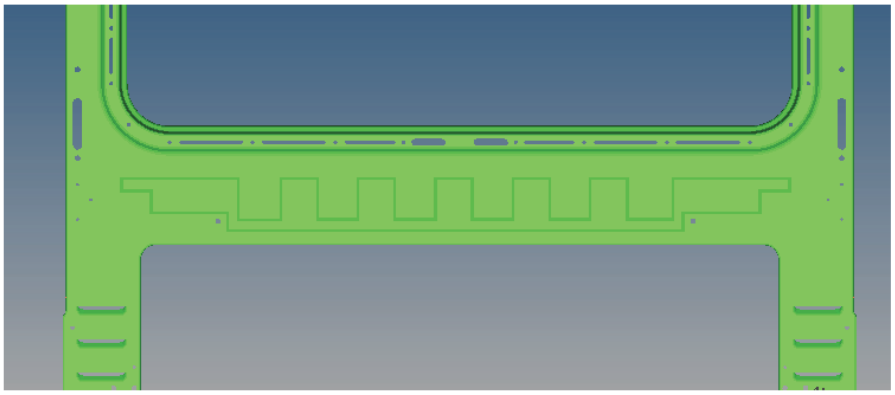


Figura 18. Embutidos de la propuesta 2

La finalidad de estos embutidos fue la de aumentar la rigidez en la parte central del marco, estas geometrías fueron resultado de una optimización que se hizo en el software en la que se le especificó que aumentara la rigidez en la parte central y disminuyera los desplazamientos en la zona de las bisagras. El resultado de la optimización se muestra en la figura 19. A partir de este resultado se propusieron los embutidos y de acuerdo a la animación en el software se descubrió que el sentido en la dirección de los desplazamientos cambió de dirección, es decir, originalmente el desplazamiento se daba en dirección z negativo, y después de los embutidos, la dirección cambio a z positivo.

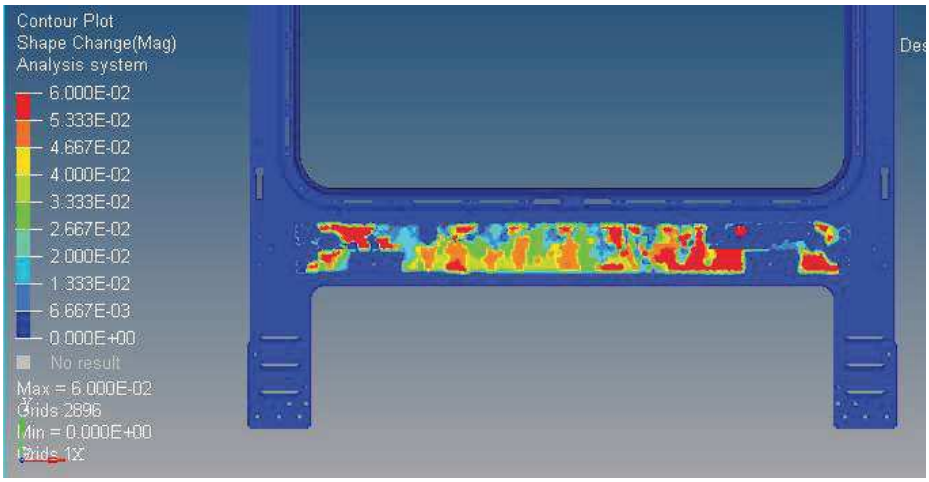


Figura 19. Resultado de la optimización

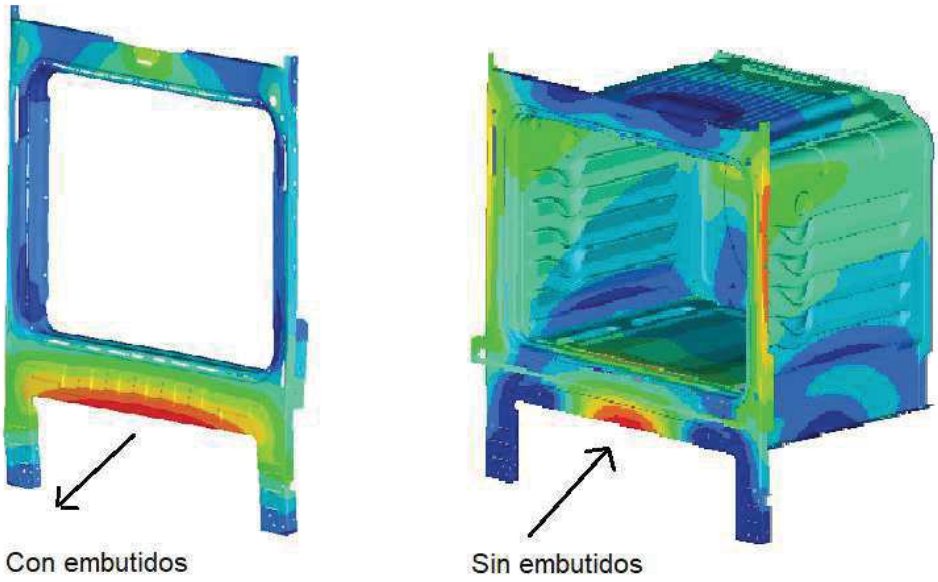


Figura 20. Cambio de sentido en la dirección de los desplazamientos

En la figura 20 se observa el cambio en el sentido de la dirección de los desplazamientos en la parte central del marco, con embutidos y con el diseño original. Este resultado permite darnos cuenta que ciertas geometrías permiten direccionar los esfuerzos y los desplazamientos en una estructura.

5. Conclusiones

Las simulaciones desarrolladas tuvieron el objetivo principal de determinar que componentes provocan el desplazamiento de la puerta del horno al estar expuestos a temperaturas altas y proponer la solución para evitar o disminuir ese desplazamiento. Se identifico que el componente que propicia el desplazamiento es el marco frontal. Por ello se propusieron los embutidos con la finalidad de aumentar la rigidez en el marco para reducir los desplazamientos en la zona donde están ubicadas las bisagras para reducir el desplazamiento de la puerta del horno, inicialmente se pensó que los embutidos aumentarían la rigidez y el desplazamiento en la puerta se reduciría, pero analizando los resultados de las simulaciones se pudo observar que los embutidos cambiaron la dirección de los desplazamientos.

El estudio de como direccionar los esfuerzos y los desplazamientos en una estructura basándose en las geometrías de los embutidos es un objeto de interés para trabajos futuros en el diseño de estufas domésticas.

Referencias

[1] Hibbeler R.C. *“Mecánica de materiales”,* Prentice Hall, sexta edición, 2006.
[2] Liu G.R. “*The finite element method”,* A practical course, Elsevier, segunda edicion
[3] Bower A. “Applied Mechanic of Solids” ,2012

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 37, pp.457 – 482, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Comparación de Imágenes para Reconstrucción con Línea Láser Discriminando Canales para Reducción de Ruido

[1]Díaz Cano Carlos Daniel, [2]Pedraza Ortega Jesús Carlos, [2]Ramos Arreguín Juan Manuel, [2]Aceves Fernández Marco Antonio y [2]Vargas Soto José Emilio

[1]Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
[2]Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería
carlosd.dc.it@gmail.com

Resumen

En este artículo se muestra un método para reducción de ruido, la discriminación de ruido, el cuál es aplicado para línea láser. Desde hace tiempo se ha intentado reproducir objetos físicos en modelos digitales por medio de reconstrucción. El método de triangulación es uno de los principales en línea láser, el cual a través de un procesamiento de imágenes, permite obtener la silueta de una línea proyectada, que sacando el centro de la luz, se consiguen los puntos que representan el espacio 3D del objeto escaneado. Por medio de algunas pruebas pre-eliminares comparando tres diferentes colores de línea láser al discriminar cada canal y luego ver de forma individual cada canal. Posteriormente se ven los histogramas de cada canal. Se llega a concluir que el verde es la solución media con el cual se parte a implementar un algoritmo para reconstrucción. Este se implementó en Python con librerías para procesamiento de imágenes y modelado de datos. Midiendo el tiempo de ejecución y los puntos generados al aplicar el método de discriminación contra la no aplicación de este, demuestra que no adiciona tiempo considerable, así como una cierta pérdida de información. Se concluye que el método de discriminación en efecto reduce el ruido a compromiso de pérdida de información sin carga adicional a todo el proceso.

Palabras clave: Reconstrucción 3D, línea láser, triangulación, reducción de ruido, procesamiento de imágenes digitales.

1. Introducción

Desde hace varios años se ha buscado recrear objetos físicos de manera digital para tareas variadas que van desde la ingeniería inversa [1], preservación de objetos históricos [2], modelos para prótesis, y desarrollo de calzado [3]. A lo cual han surgido varios métodos de reconstrucción al punto que existe toda una taxonomía, teniendo métodos de contacto o destructivo y sin contacto o no destructivo.

Los métodos sin contacto usan sistemas que hacen uso de dispositivos que no requieren de algún aditamento que requiera tocar la superficie del objeto, resultando en otras subcategorías que consisten en reflexión y transmisión. De entre esos dos el de reflexión se divide en métodos ópticos que dependen mucho del uso de cámaras que capturen el objeto al cual se le adicione algún medio que pueda reflejar la forma del objeto.

Para ello existen los métodos como luz codificada, línea láser, luz estructurada y cambio de fase. Siendo la línea láser uno de los más empleados e investigados y que forma parte de los métodos de triangulación, que como su nombre lo indica hace uso de la figura geométrica para poder calcular la forma del objeto al medir distancias y ángulos desde un punto emisor al receptor.

Algunos trabajos recientes con línea láser buscan producir diseños para femorales [4], modelos tipo yeso para muñecas [5] y de ortodoncia [6]. Lo que indica un uso en la actualidad, por lo que mejoras son requeridas para obtener modelos con mayor exactitud a su contraparte física.

Entre las propuestas de mejora, se encuentran métodos interesantes como sumergir el objeto en agua y proyectar el láser en el agua [7]. Así como un posterior intento para reproducir el color con el uso tres láseres de colores diferentes [8]. También se intenta mejorar la obtención del centro de la luz con el uso de un kernel circular [9].

En esta ocasión se ha propuesto mejorar la reducción del ruido al hacer una discriminación de canales para el método de triangulación láser. La reducción de ruido es importante en el campo de reconstrucción, ya que existen métodos que dependen mucho de la carencia de este pues algunos asumen que la información empleada es libre de ruido [10].

Existen varios métodos de reducción de ruido, algunos tratan de reducir el ruido por medio de programación en paralelo [11], usar algoritmos de mínimos cuadrados rápidos estables numéricamente (NS-FRLS, siglas de: Numerically Stable Fast Recursive Least Squares) [12], aplicar un filtro Kalman segmentando imágenes por textura usando coeficientes locales de variación [13], difusión anisotrópica [14-15], y también existen trabajos que trabajan con imágenes a color usando filtros adaptativos de componentes del color [16].

Para este proyecto se emplea una plataforma giratoria sobre la cual se coloca el objeto a reconstruir, frente al objeto se coloca una cámara fotográfica digital y adyacente a este, un rayo láser para poder capturar la silueta proyectada sobre el objeto en un ambiente oscuro. Teniendo el conjunto de imágenes se procede a realizar el procesamiento de imágenes para encontrar los puntos sobre los cuales el láser recae sobre el objeto. Esto se planea hacer con láseres de diferentes colores, con el fin de emplear en un paso intermedio, la discriminación de un canal para encontrar cual es el que reduce el ruido y si este muestra una mejora a usar los tres canales. Como siguientes pasos está el obtener una serie de puntos que permita reconstruir el objeto y este sea proyectado.

Se empleó el lenguaje de programación Python para la realización de este proyecto, aprovechando el uso de algunas librerías que permitieran la carga de imágenes y visualización de los modelos.

La estructura de este capítulo empieza con las pruebas iniciales en la sección 2 para determinar en una primera instancia si es factible reducir el ruido por la discriminación de ruido a través de unas pruebas con las imágenes tomadas y tres colores de láseres dividiendo los canales y hacer las combinaciones posibles para observar la cantidad de luz capturada que se puede considerar como ruido y así determinar cuál de todos se empleará para procesar sus imágenes. La sección 3 es el procesamiento de imágenes donde se muestran algunos resultados cuando se aplica y cuando no la discriminación de canales para comprobar si el ruido es reducido, así como el algoritmo empleado para la reconstrucción. La sección 4 muestra los resultados de la reconstrucción, así como la obtención de las posiciones de los puntos en un espacio tridimensional. La sección 5 contiene el código en Python empleado así como una corta lista de las librerías requeridas para correr el programa mostrado. En la sección 6 se muestran y discuten los resultados finales de reconstrucción. Se finaliza en la sección 7 con las conclusiones llegadas a partir de todas las pruebas realizadas y que se podría hacer para combatir los problemas encontrados.

2. Pruebas iniciales

Se decide emplear el uso de tres láseres de diferentes colores, siendo estos rojo, verde y azul, los mismos colores básicos que componen la visión humana y los dispositivos de captura comunes. Las características de los láseres se muestran en la tabla 1.

Los objetos empleados para las pruebas fueron una cabeza de unicel pintada en negro, un cráneo de cerámica, una campana de cerámica también pintada en negro y un cerdo de cerámica. Estos pueden ser vistos en la figura 1.

Una forma pre-eliminar de observar si la hipótesis es factible, fue aplicar la discriminación de canales con cada láser diferente y ver las imágenes obtenidas. Esto nos brinda una forma de observar el comportamiento de una imagen con respecto al color del láser y los canales que la componen. En una primera instancia con la eliminación de un único canal por cada láser, se encontró que en todos al eliminar el canal que equivale al color del láser, la reducción del ruido se vuelve aparente.

Tabla 1. Características de los láseres.

Característica	Rojo	Verde	Azul
Longitud de onda	650 nm	532 nm	405 nm
Energía emitida	3 mW	5 mW-	5 mW
Voltaje	3 V, CD	3 V, CD	3.2 V, CD
Clase	IIIa	IIIa	IIIa

(a) (b) (c) (d)

Figura 1: Objetos de prueba para reconstrucción. (a) Cabeza; (b) Cráneo; (c) Campana; (d) Cerdo

2.1 Comparaciones a dos canales

En los casos del rojo mostrados en la figura 2, durante la discriminación del canal R se puede apreciar una reducción del reflejo de la luz, comparado a los otros dos casos. En el caso del canal B discriminado, en la parte de la dentadura y sobre todo de la nariz, la línea de la silueta se confunde con el reflejo de la luz, por lo que el ruido es considerable, siendo la imagen original con el caso del canal G discriminado muy similares.

Mientras que en el azul, figura 4, no se alcanza a percibir diferencia aparente entre los canales que emplean el azul y la imagen original, siendo esto tan mínimos que es despreciable, sin embargo en el caso en el cual se discrimina el azul, se nota una gran diferencia, pero da la sensación de que existe pérdida de información, tal como podría ser por la parte inferior del hueco de la nariz, y en la parte superior de la frente.

En el caso del láser verde mostrado en la figura 3, su respectivo canal genera un reflejo de luz en un radio considerable que podría afectar al momento de buscar el punto específico sobre el cual el rayo de luz hace primer contacto con el objeto. En los casos tanto el R como B discriminados, se muestran similares a la imagen original, siendo en el caso del canal G discriminado, en el cual el reflejo prácticamente imperceptible, con la zona de la nariz el único lugar donde se muestra un ruido aparente.

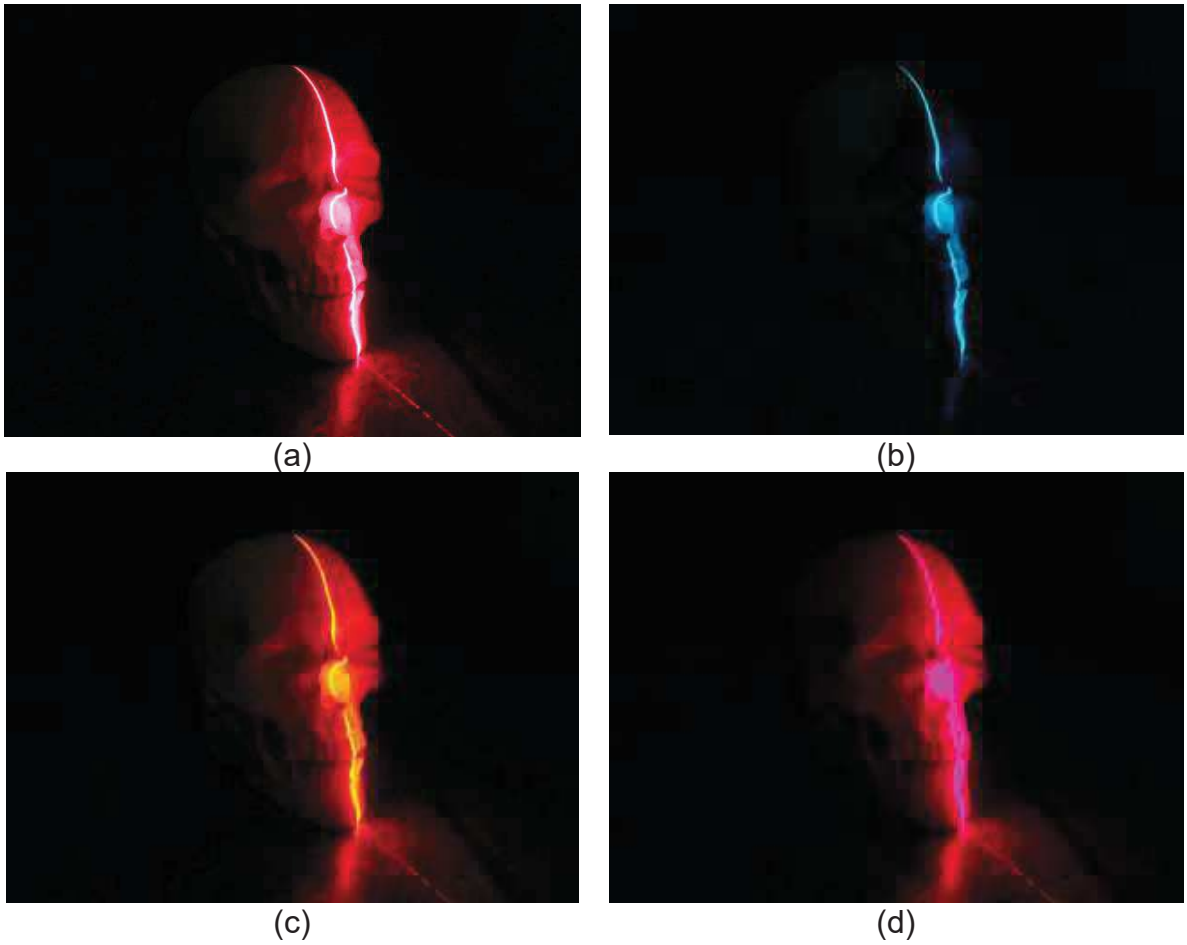
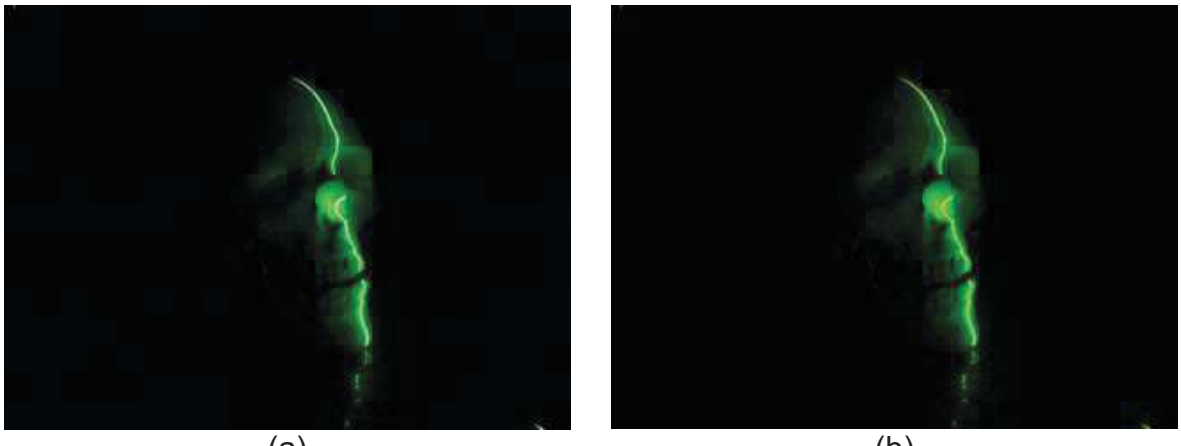


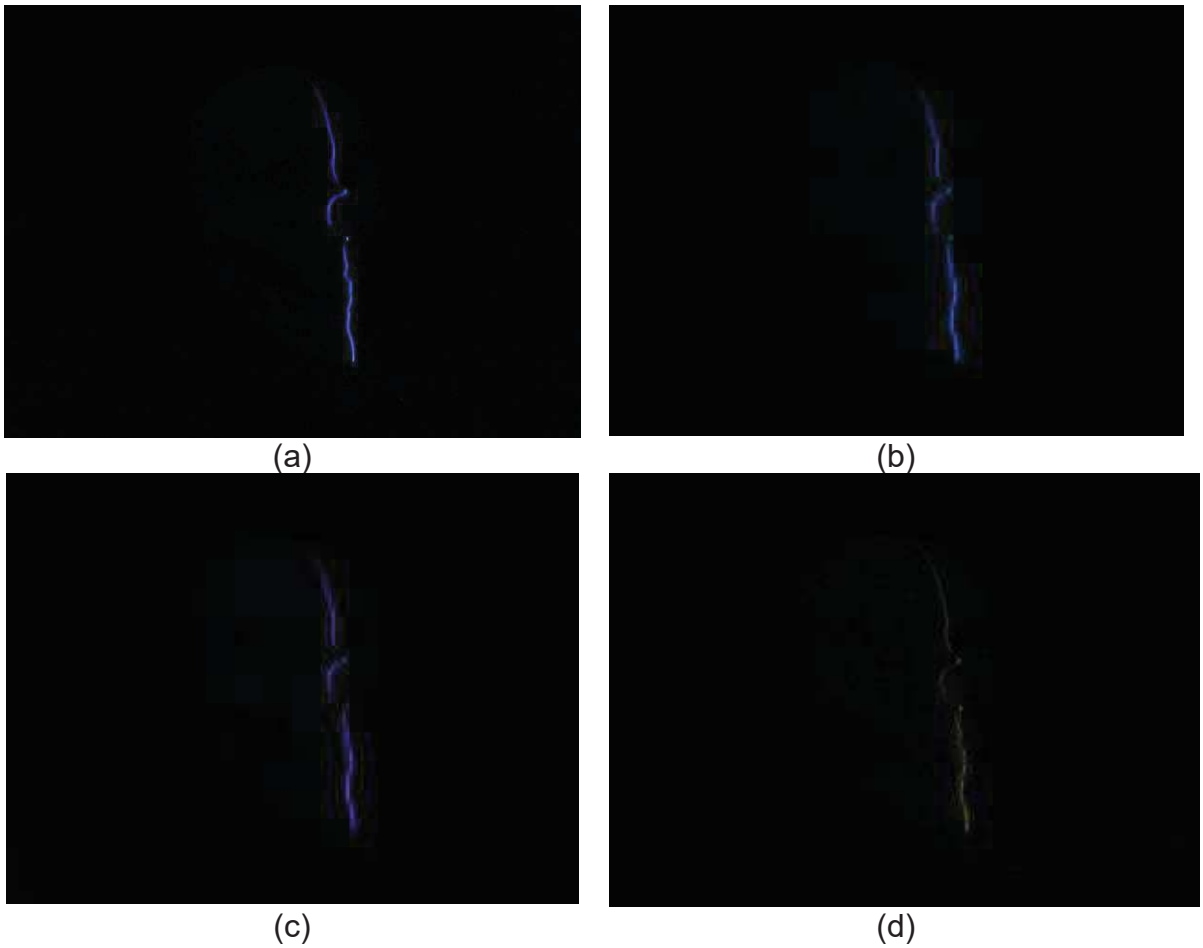
Figura 2: Captura con láser rojo y discriminación de canales. (a) Imagen original; (b) Canal R discriminado; (c) Canal G discriminado; (d) Canal B discriminado.



Sinergia Mecatrónica, Capítulo 37, pp.457 – 482, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

(c) (d)

Figura 3: Captura con láser verde y discriminación de canales. (a) Imagen original; (b) Canal R discriminado; (c) Canal G discriminado; (d) Canal B discriminado.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 4: Captura con láser azul y discriminación de canales. (a) Imagen original; (b) Canal R discriminado; (c) Canal G discriminado; (d) Canal B discriminado.

2.2 Comparaciones a un canal

Una segunda prueba consiste en tomar un único canal que sirva de referencia para conocer la cantidad de información almacenada en cada uno. En el caso del láser rojo, figura 5, es evidente que el su canal correspondiente excede la cantidad de información en comparación a los otros dos, por lo que se puede considerar que en este como poseedor de una gran cantidad de ruido, mientras que en los otros canales, se puede apreciar la línea que corresponde a la silueta del objeto correspondiente a la vista. De entre las los canales, el canal G es el que muestra menos ruido y la línea sigue presente para poder obtener la información deseada.

En el caso del láser verde mostrado en la figura 6, el canal G que corresponde al verde, muestra un exceso de información, la mima situación que ocurre con el láser rojo. En cuanto a los otros dos canales, sorpresivamente son prácticamente idénticos, siendo el B con una intensidad ligeramente mayor a R. Igualmente en los canales no correspondientes al color del láser, la línea de la silueta es visible, por lo que es perfectamente útil para intentar generar la nube de puntos.

Para el caso del láser azul, no se aprecia mucho ruido, incluso parece que en este caso la mejor opción es emplear el canal B, tal como se muestra en la figura 7, en el caso del canal de color correspondiente hay una línea notable. Sin embargo existe en ocasiones que se presente una ligera pérdida de información por la baja intensidad obtenida las imágenes, sobre todo en los dos canales restantes donde la línea no se tan clara como con los láseres rojo y verde.

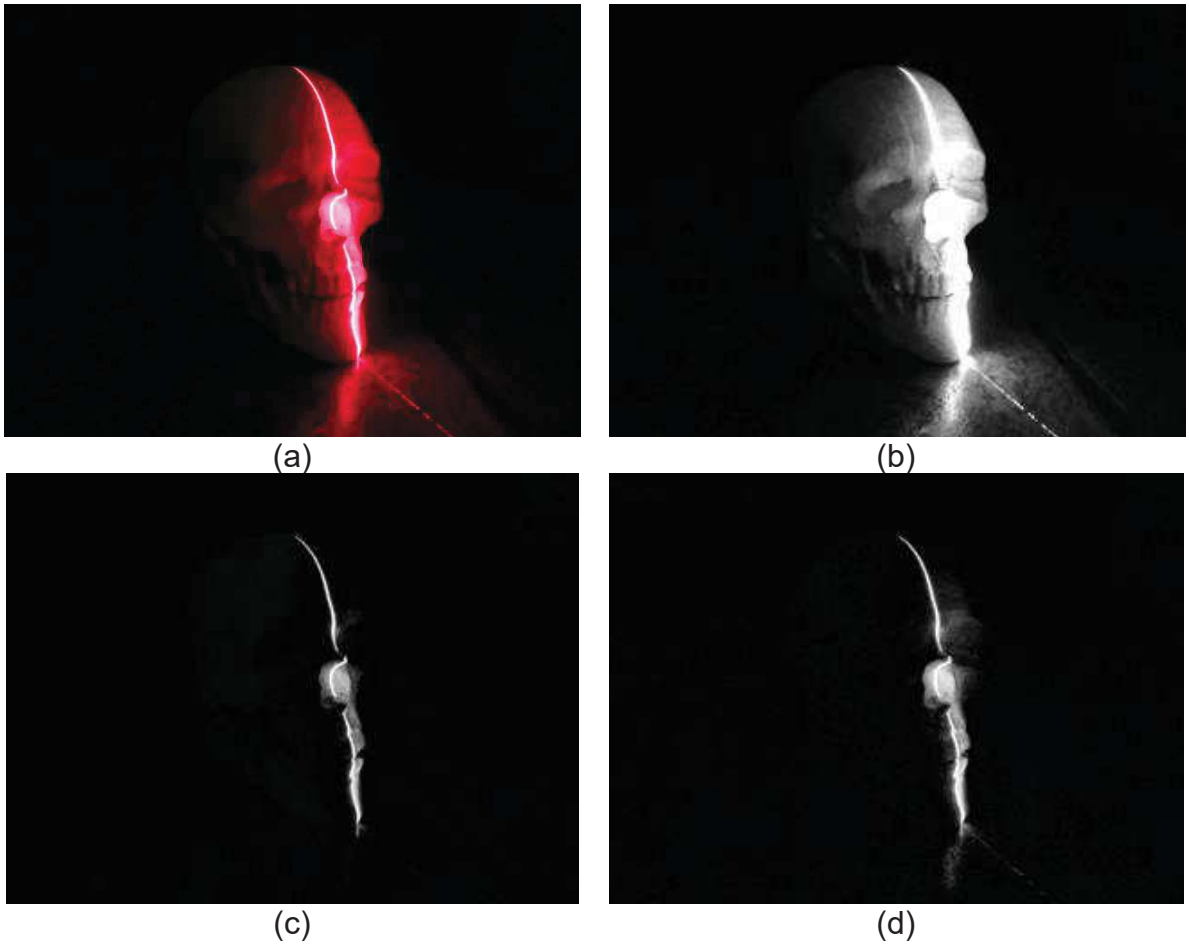


Figura 5: Canales individuales de la imagen con láser rojo. (a) Imagen original, (b) Canal R, (c) Canal G, (d) Canal B.

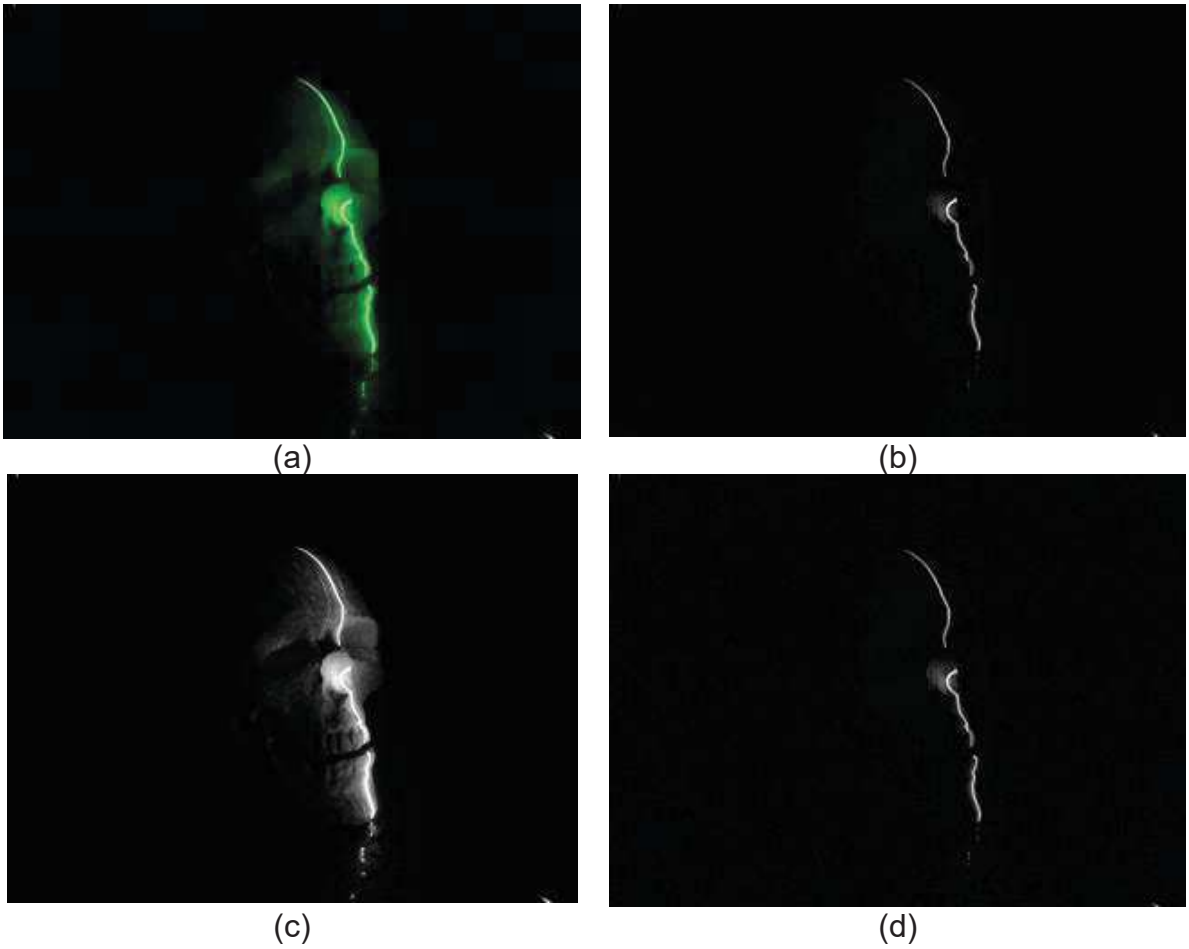
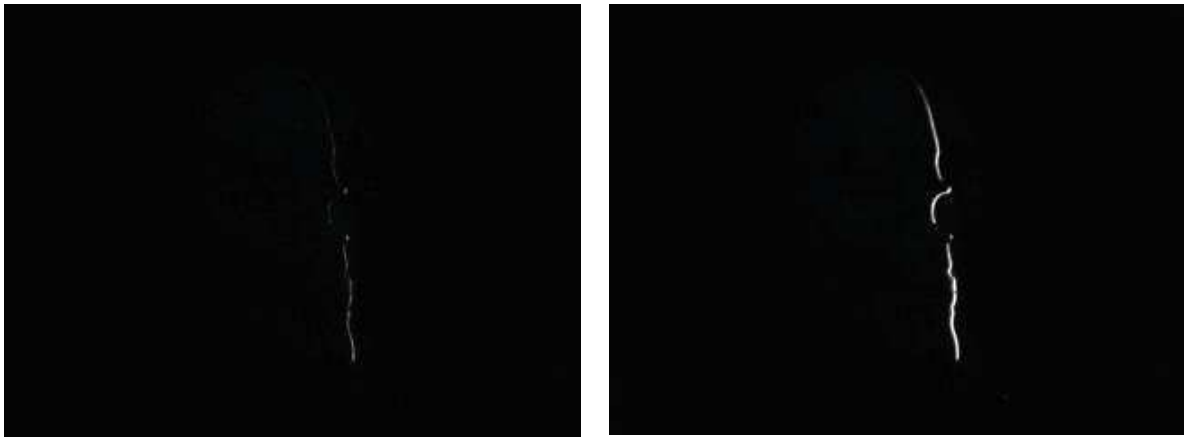


Figura 6: Canales individuales de la imagen con láser verde. (a) Imagen original, (b) Canal R, (c) Canal G, (d) Canal B.



(c) (d)

Figura 7: Canales individuales de la imagen con láser azul. (a) Imagen original, (b) Canal R, (c) Canal G, (d) Canal B.

2.3 Revisión de histogramas

El histograma es una herramienta empleada comúnmente para la separación entre objeto de fondo, por lo que se procedió a también hacer una comparación de histogramas de canal para hacer una inspección que permita comprender un poco el comportamiento del ruido en cada caso de láser y canal.

El primer caso con el rojo, se puede ver muy claramente como en el canal R hay un considerable incremento en los niveles cercanos al blanco, si consideramos que el alto de la imagen es de 240 píxeles, significaría que se esperaría de manera ideal esa cantidad de píxeles en los niveles más altos, preferentemente a nivel de 255 que es valor máximo que podría tomar un píxel, esto asumiendo la línea cubriera todo el eje *y*. Sin embargo en la realidad eso casi nunca ocurre. De manera manual se estima que la línea deseada tiene 160 píxeles de altura, mientras que en el histograma los 10 valores más altos (246-255) suman un total de 1558, eso es casi 10 veces la cantidad deseada. Esto explicaría en gran medida el motivo del porque en la figura 5c, la línea se empieza a perder en las zonas de la nariz y dentadura. En cuanto a los canales G y B, como se observó en la figura 5, la línea es mucho más distinguible, sin embargo la suma de los 10 valores más altos fue de 15 y 46 respectivamente, eso significa que no es posible buscar la línea entre esos valores. Sin embargo visualmente es razonable considerar que la línea es aún es recuperable y los métodos que trabajan con el histograma pueden servir para nuestro propósito.

El siguiente caso, que es el láser verde, como se puede apreciar en la figura 10 el histograma correspondiente a G, no existe el incremento en los valores como sucedió con el láser rojo. Incluso al hacer la suma de los 10 valores más altos, da un total de 69, otra vez menor a lo que podría ser la línea, pues se esperaría un mínimo de 120 de altura. Al igual que con la figura 6, los canales R y B muestran un comportamiento similar. Las semejanzas hasta el momento con el histograma entre el láser rojo y verde, consisten en que sus respectivos canales R y G, tienen un ancho mayor en los niveles iniciales de los píxeles, comparado a los otros dos canales. No obstante, no se puede considerar esto como un indicativo de nivel de ruido sin un análisis a profundidad, ya que se debe tomar en cuenta las características de la cámara, láser y ambiente que pueden afectar la captura de la imagen. Siendo estas características conocidas como intrínsecas y extrínsecas.

Por último se tiene el caso del láser azul el cuyo comportamiento refleja un poco al láser verde con respecto a que la suma de los 10 valores más altos de píxel son muy bajos, llegando incluso a un total de un dígito, 8, incluso los últimos 50 son menor al dado por los últimos 10 del verde con un total de 51. Adicionalmente se vuelve notable como el canal B es más similar al R que al G, contrario a lo que se esperaría basado en la figura 7, pues se creería que el R y G fueran similares entre ellos. Esto

refuerza la noción que el láser verde genera más ruido, considerando que tanto el láser verde como el azul en sus canales predominantes, los de mayor nivel no presentan una cantidad mayor a 100 para una imagen de una dimensión de 240 x 320. En ambos casos, la suma de los 10 valores más altos en caso del láser rojo es 100 veces mayor al de los otros dos láseres. Sugiriendo que el rojo es un mayor productor de ruido en imágenes de línea láser en ambiente oscuro.

Al considerar las diferencias obtenidas por cada láser, se opta por usar el verde. Los motivos son porque es el que presenta un punto intermedio entre los tres. En el rojo como se pudo ver en la figura 5, produce resultados con fuerte intensidad, así como los resultados con los histogramas, sobre todo en el caso donde se muestra únicamente el canal R en el cual la línea no es tan visible por el ruido, perdiéndose por el reflejo producido y la gran cantidad de altos valores de píxel. Mientras el azul tienen una intensidad muy baja en el cual los otros canales, tal como se muestra en la figura 7 y sus histogramas, no se muestra la silueta tan clara como en los otros láseres y muy baja cantidad de altos niveles de píxel. Ya que el verde mostró que en su canal correspondiente, figura 6, se produce un cierto ruido pero la línea se puede diferenciar comparado al caso con el láser rojo, y sus dos canales restantes, la línea se muestra claramente sin pérdida en comparación al caso del láser azul.

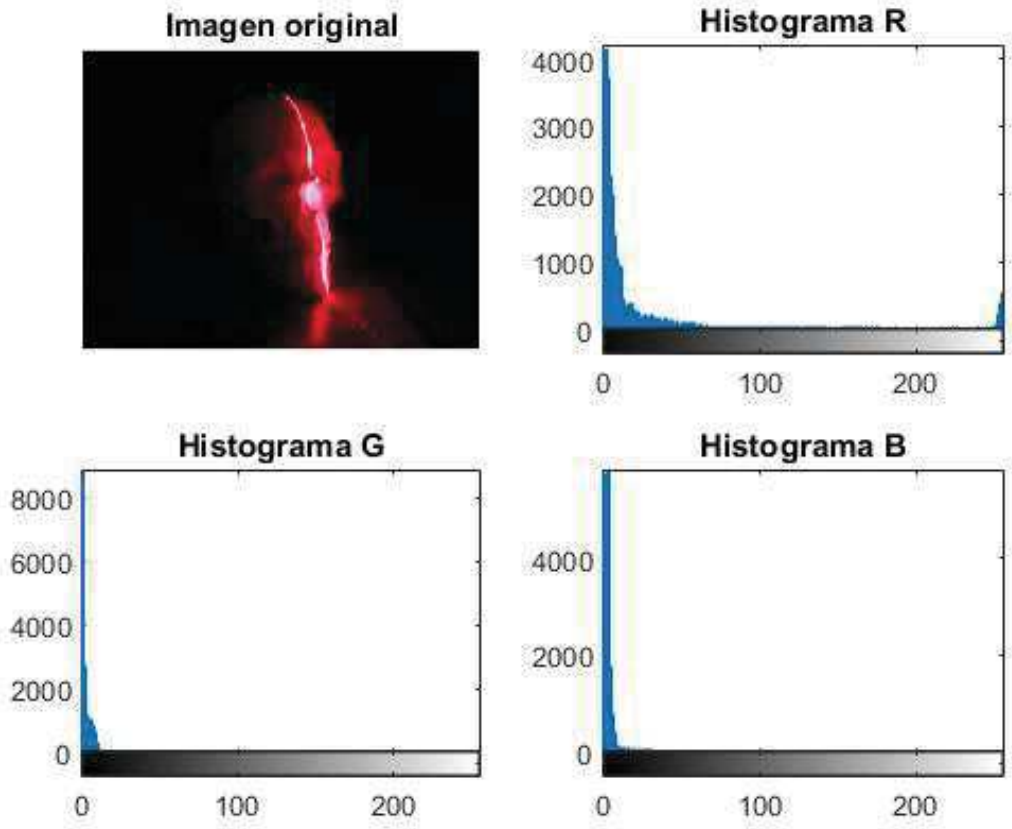


Figura 8: Histograma de láser rojo.

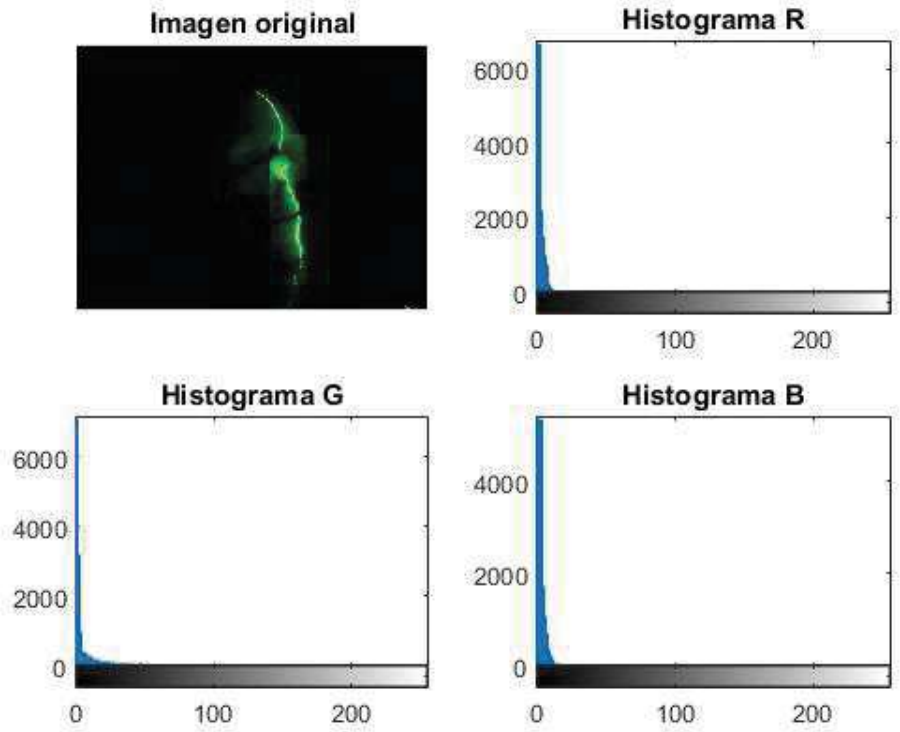


Figura 9: Histograma de láser verde.

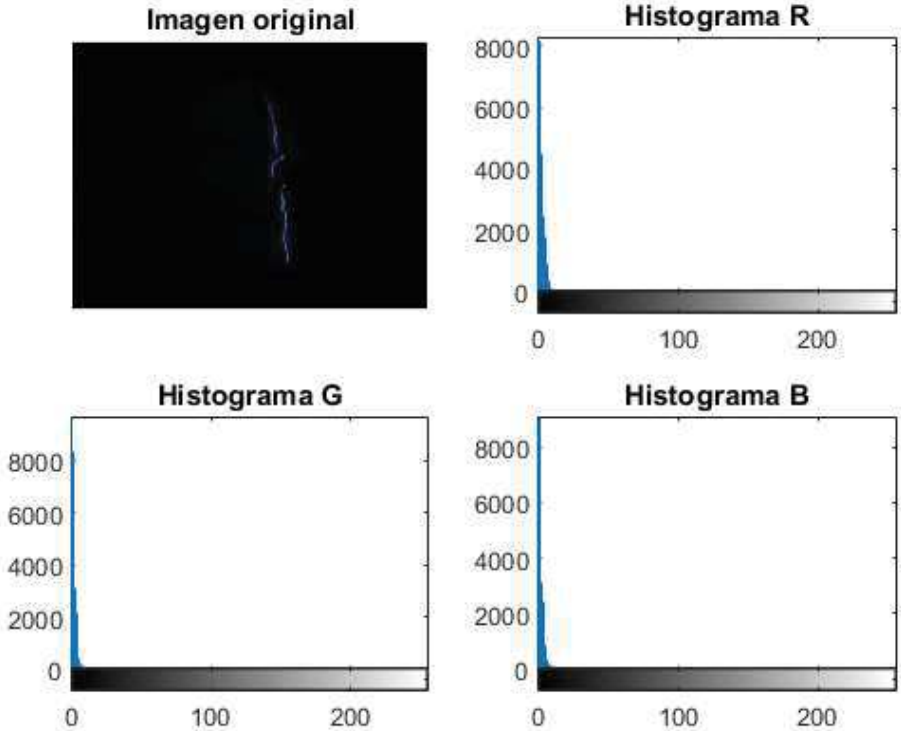


Figura 10: histograma de láser azul.

3. Procesamiento de las imágenes

El proceso para obtener los puntos que indican la forma del objeto se realiza siguiendo el algoritmo mostrado en la figura 11.

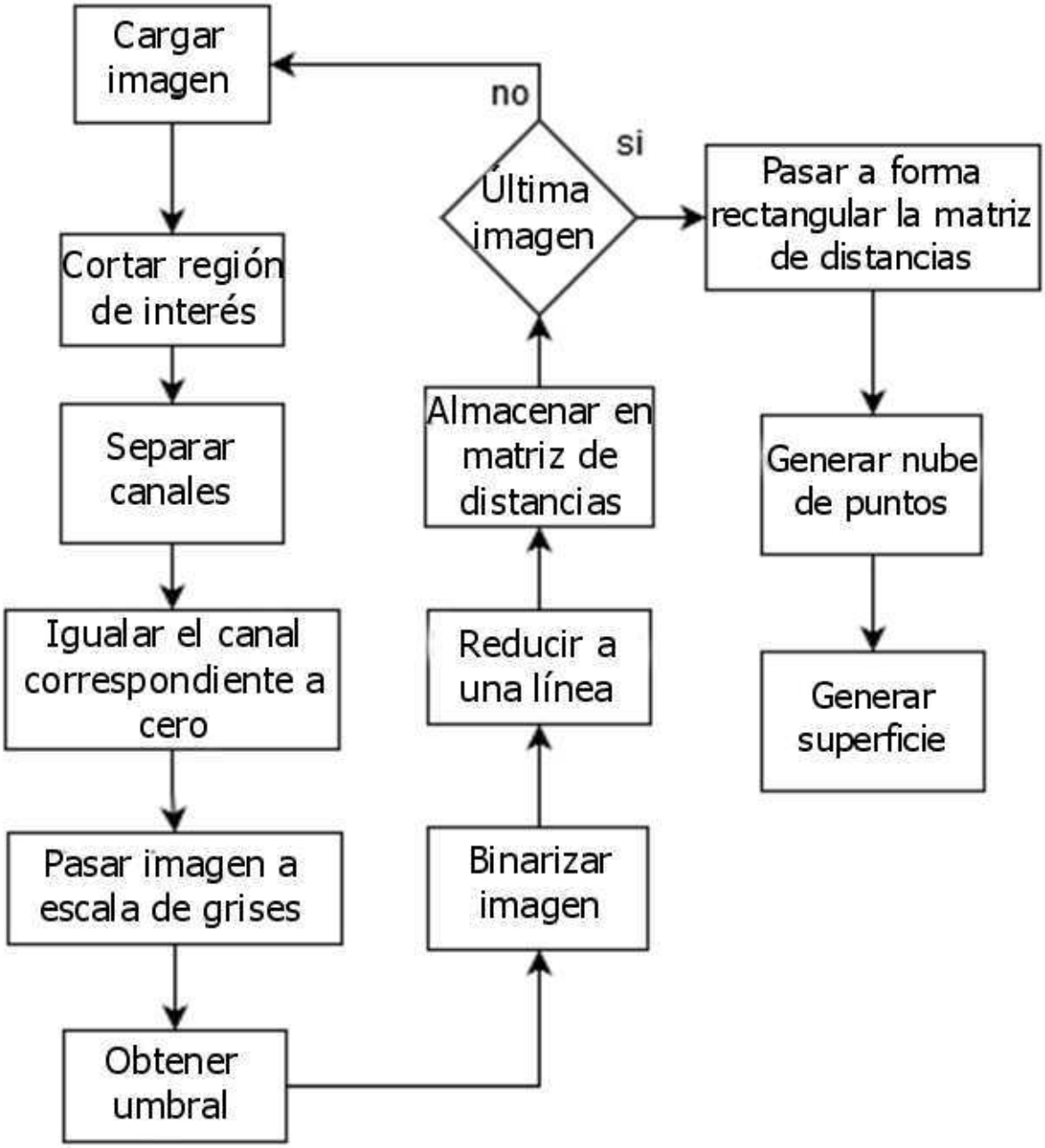


Figura 11: Algoritmo para reconstrucción empleado.

Aquí se presenta un algoritmo ligero que puede ser cargado en dispositivos de gama baja, una propuesta también para ofrecer un sistema de reconstrucción económico. El primer paso es cargar la imagen, en este caso se realizó por medio de Opencv [17], que se puede aplicar a varios lenguajes de

programación. Después es el corte de región de interés, en el cual se trata de determinar el centro del objeto y su distancia máxima con la superficie del objeto, así como la altura del objeto. Acto seguido se empieza a emplear el método de discriminación propuesto que es el tener las matrices que determinan el canal, R para rojo, G para verde y B para azul, para luego establecer el canal correspondiente al color del láser en una matriz de ceros. Un proceso bastante ligero que no afecta enormemente el desempeño de algún algoritmo de procesamiento de imágenes.

El siguiente paso consiste en convertir la imagen a color en escala de grises, que se obtiene al promediar los valores cada píxel en la misma posición de cada matriz. Quedando entonces la ecuación (1):

$$Gr = \frac{(R, G, B)}{3} \tag{1}$$

Quedando entonces una matriz *Gr* que corresponde al valor promedio de las matrices *R*, *G* y *B*. La imagen generada por está matriz debe pasarse a binario, el cual como lo indica su nombre, solo puede tener dos valores, lo que significa que se obtendrá una imagen en blanco y negro. Para poder hacer esto, se debe determinar un valor sobre el cual se determina si un píxel pasará a ser blanco o negro. Existen varios métodos para obtener dicho valor, de los cuales se utilizará el de Otsu [18], el cual es usado aún hoy día [19-24], considerándolo como un método suficientemente fiable que ha sido incluido en diversas librerías [25], incluyendo OpenCV, y otros lenguajes de programación.

Dicho método utiliza el histograma y se obtienen las probabilidades o momentos acumulativos de cada tono en la escala de grises, y las divide en dos grupos de forma iterativa hasta el máximo valor de la imagen. Una vez obtenidos los valores de las probabilidades de cada imagen para cada caso, se obtiene su varianza máxima, el cual será considerado como el umbral óptimo. Su implementación se describe en las ecuaciones (2) al (7):

$$\omega_0 = \sum_{i=1}^{t} p_i \tag{2}$$

$$\omega_1 = 1 - \omega_0 \tag{3}$$

$$\mu_0 = \frac{\sum_{i=1}^{t} i * p_i}{\omega_0} \tag{4}$$

$$\mu_1 = \frac{\left(\sum_{i=t+1}^{N} i * p_i\right) - \mu_0}{\omega_1} \tag{5}$$

$$\sigma_w^2(t) = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 \tag{6}$$

$$U = \max(\sigma_w^2(t)) \tag{7}$$

En donde:

- *t*: es el umbral siendo evaluado.
- *N*: es el valor máximo que puede tomar un píxel.
- *p*: los valores probables obtenidos a partir del histograma de la imagen.
- ω_0: es la probabilidad acumulada desde 1 hasta t.
- ω_1: es la probabilidad acumulada desde t+1 hasta N.
- μ_0: Los momentos cumulativos del histograma desde 1 hasta t.

- μ_1: Los momentos cumulativos del histograma desde t+1 hasta N.
- σ_w^2: La varianza de t, donde la máxima es la óptima.
- *U*: Es el umbral óptimo.

Una vez obtenido el umbral como se muestra en la figura 13, se pasa la imagen a blanco y negro generando una matriz *bn*. Requiriendo de seguir la regla de la ecuación (8) por cada píxel p:

$$bn(x,y)\begin{cases} 0, & p(x,y) < U \\ 1, & p(x,y) \geq U \end{cases} \tag{8}$$

Con la imagen binaria se procede a adelgazar el grosor de la línea para obtener la silueta del objeto requiriendo que solo exista un único píxel por fila, el método más común es el del centro de la masa, el cual es descrito en la ecuación (9):

$$md(x,y) = \frac{\sum p(x,y)x}{\sum p(x,y)} + c \tag{9}$$

Donde:

- md: es la matriz de distancia que almacenará el valor de la distancia del píxel desde el centro hasta el punto donde la línea es registrada.
- $p(x,y)$: es el valor del píxel siendo sumado.
- *x*: es la posición en el eje x.
- *c*: es un valor constante que sirve para rectificar un posible error en el centro del objeto al capturar la imagen.

De esta manera se tiene la imagen final que permitirá generar los puntos en un espacio tridimensional que representan el objeto físico.

Como se comentó en un principio, este algoritmo se aplicó con la variación en el paso que precede a la conversión a escala de grises. Esto sirviendo para reducir el ruido, tal como se muestra en la figura 12.

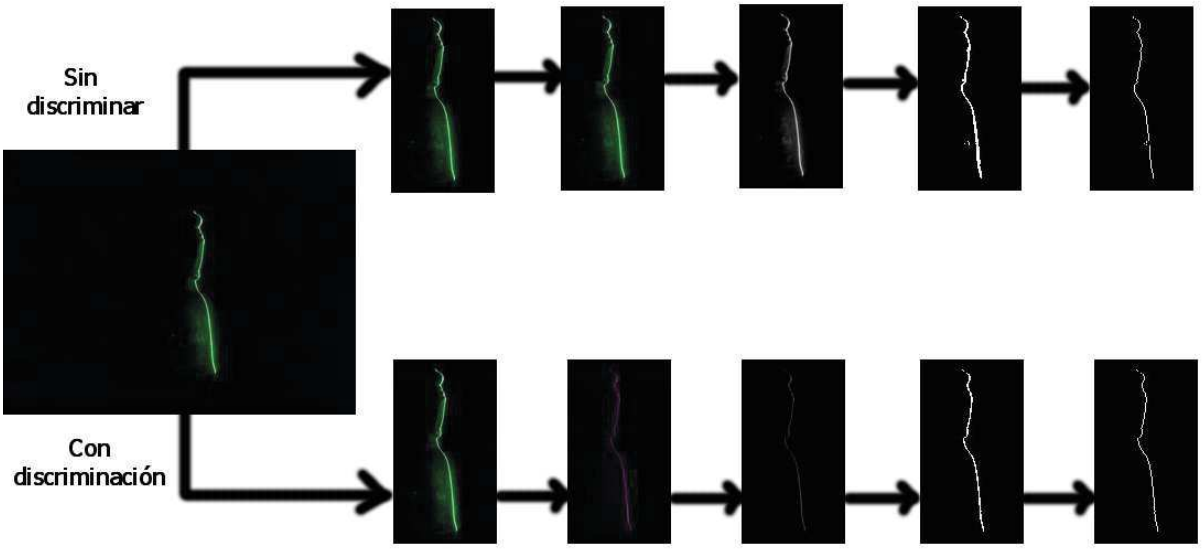
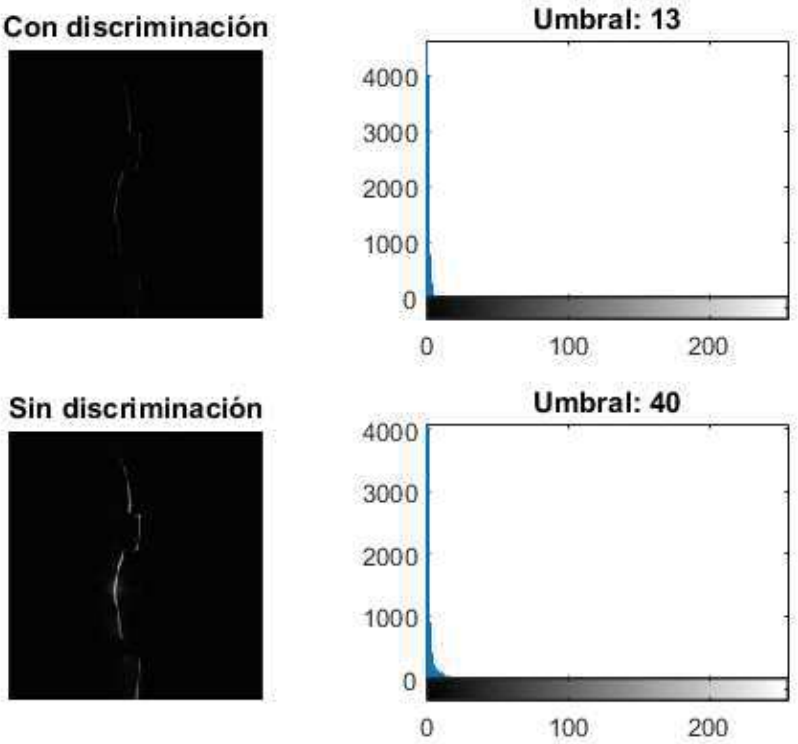
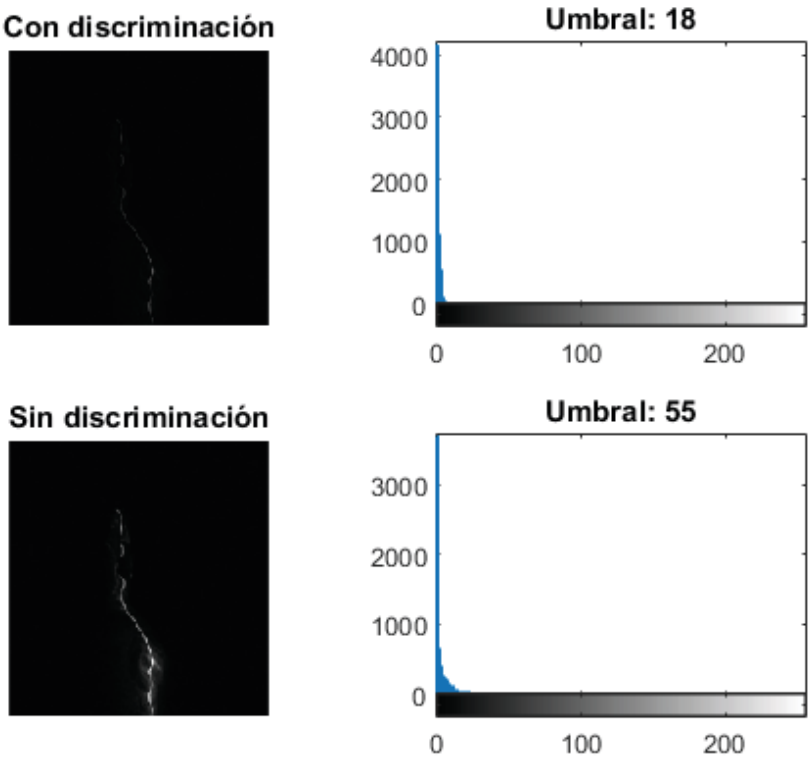


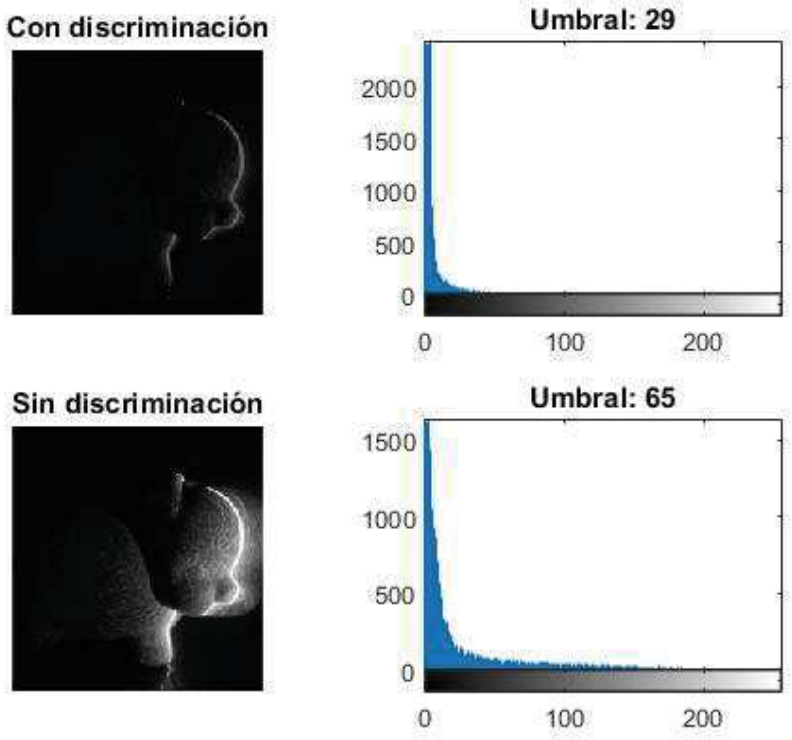
Figura 12: Procesamiento de imágenes con y sin discriminación.


Con discriminación
Umbral: 13
4000
3000
2000
1000
0
0
100
200
Sin discriminación
Umbral: 40
4000
3000
2000
1000
0
0
100
200

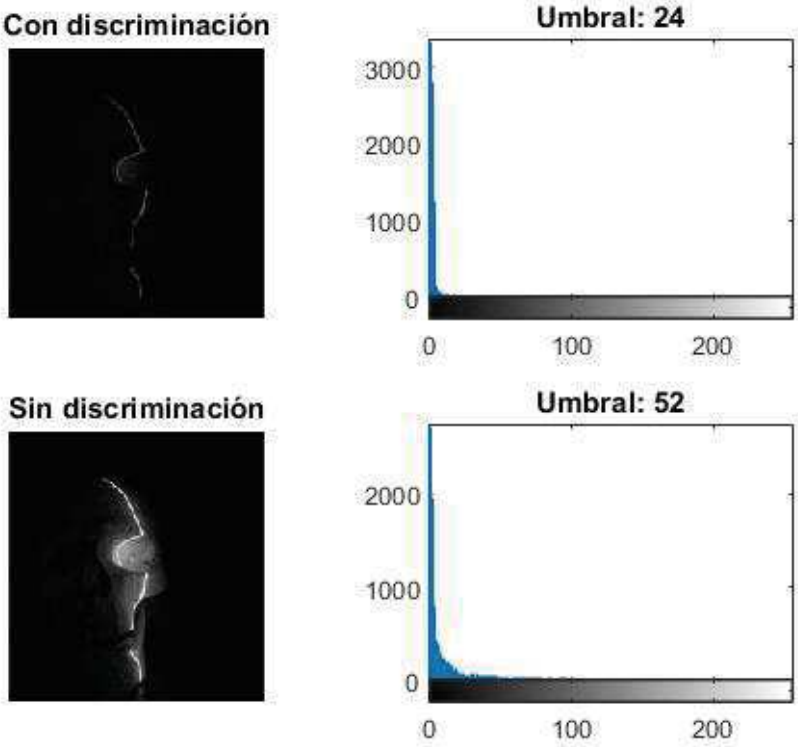
(a)


Con discriminación
Umbral: 18
4000
3000
2000
1000
0
0
100
200
Sin discriminación
Umbral: 55
3000
2000
1000
0
0
100
200

(b)



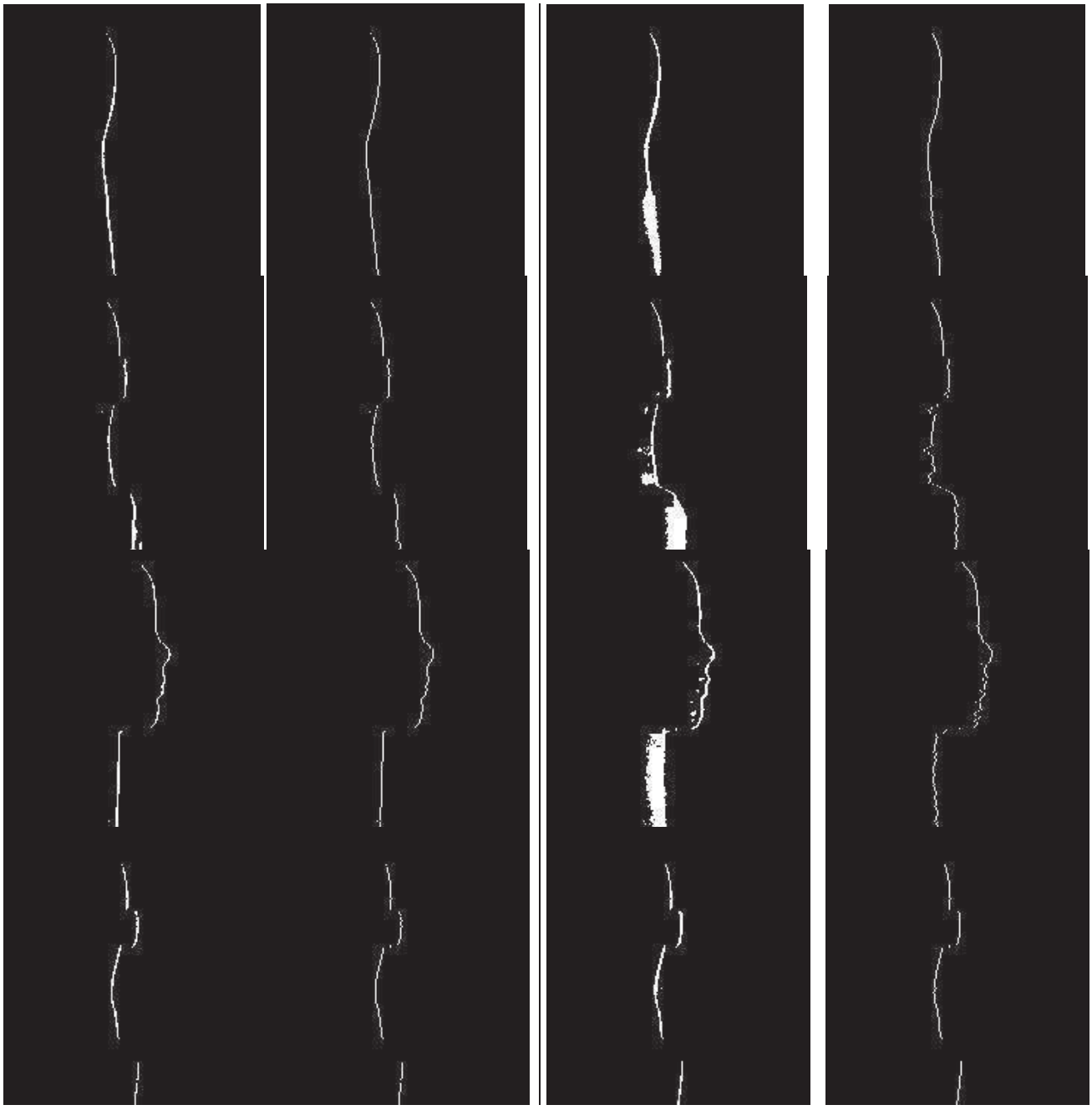
(c)



(d)

Figura 13: Histogramas y su umbral con Otsu. (a) Cabeza; (b) Campana; (c) Cerdo; (d) Cráneo.

En general, se encuentra una mejoría de las imágenes al aplicar la discriminación, ya que en varias ocasiones se encuentra una distorsión en la línea delgada, así como ciertas manchas en la imagen binaria que requerirán de un proceso adicional para eliminarlos y no influyan en la obtención de la silueta. Es así que se siguieron las pruebas con los demás objetos, de los cuales en la figura 14 se muestran algunas comparaciones cuando se aplica y cuando no, la discriminación de canales con la cabeza.



(a) (b)

Figura 14: Comparaciones de aplicar discriminación de canales. (a) Con discriminación; (b) Sin discriminación

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 37, pp.457 – 482, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

4. Proceso de reconstrucción

Siguiendo el método de triangulación, es posible determinar la profundidad de un objeto basándose en los ángulos de giro de la plataforma giratoria. El primer paso para el proceso de reconstrucción es del pasar la posición de los puntos de su forma angular a la forma polar, empezando por obtener el ángulo de desplazamiento que resulta de dividir la cantidad de imágenes más uno y dividirlo por un giro completo de 360°, este paso queda descrito en la ecuación (10).

$$\theta(i) = \frac{n+1}{360°} \tag{10}$$

En donde:

- n: es el número de imágenes utilizadas.
- θ: es el ángulo de desplazamiento en grados.

Sin embargo es requerido el ángulo en radianes θ', que se consiguen fácilmente con la ecuación (11).

$$\theta'(i) = \frac{\theta(i)}{180}\pi \tag{11}$$

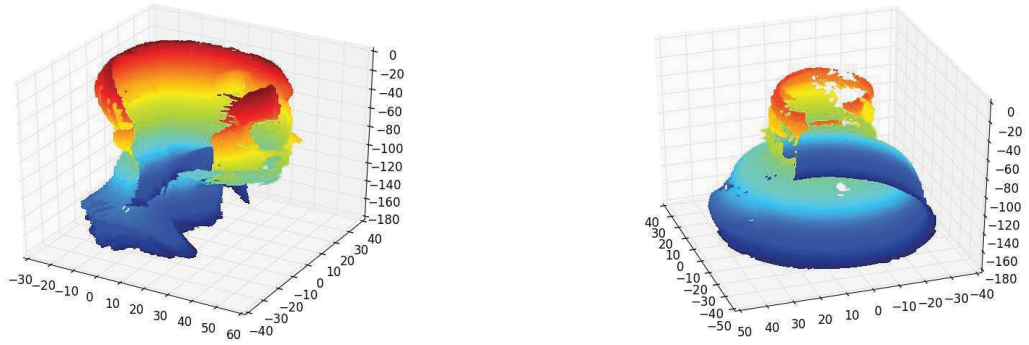
Para obtener la forma polar se emplea las ecuaciones (12) y (13) para poder obtener la matriz X de la posición x y la matriz Y de la posición y del punto en el espacio. Mientras que la matriz Z es fácilmente deducible con (14) usando la posición y en cada iteración.

$$X(x,y) = md(i,j)cos\theta'(i) \tag{12}$$

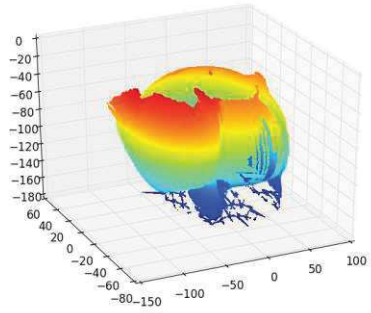
$$Y(x,y) = md(i,j)sin\theta'(i) \tag{13}$$

$$Z(x,y) = j \tag{14}$$

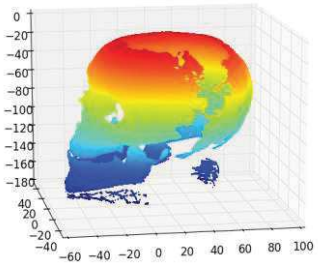
De esta forma se tiene la nube de puntos que representa el objeto en un plano de tres dimensiones. Para esto se usa la función plot_surface de la librería matplotlib para Python, cuyas reconstrucciones se muestran en la figura 15.



(a) (b)



(c)



(d)

Figura 15: Objetos reconstruidos con discriminación de canales. (a) Cabeza; (b) Campana; (c) Cerdo; (d) Cráneo

5. Código Python

En esta sección se comparte el código para reconstrucción desarrollado en Python versión 2.7. Para su funcionamiento se requerirán de las librerías indicadas en la tabla 2.

Tabla 2: Librerías requeridas.

Librería	Versión
numpy	2.2.4
opencv	2.4.13.6
matplotlib	1.16.3

```
1:    import numpy as np
2:    import cv2
3:    from matplotlib import pyplot as plt
4:    from matplotlib import cm
5:
6:    def tic():
7:    #Homemade version of matlab tic and toc functions
8:        import time
9:        global startTime_for_tictoc
10:       startTime_for_tictoc = time.time()
11:
12:   def toc():
13:       import time
14:       if 'startTime_for_tictoc' in globals():
15:           print "Elapsed time is " + str(time.time() - startTime_for_tictoc) + "
      seconds."
16:       else:
17:           print "Toc: start time not set"
18:
19:   nImg = 255#Cantidad de imagenes
20:   ext='.jpg'#Extesion de archivo a leer
21:   #RDI (Region de interes)
22:   x1=100
23:   y1=10
24:   x2=280
```

```
25:   y2=200
26:   r0=-55#Ajuste en caso de que no este centrado el objeto
27:   c0=1#Canal de color a discriminar
28:   cp=0#Contador para puntos generados
29:   size = nImg+1, y2-y1#Tamano de matriz de distancia
30:   matDis=np.empty(size) #Matriz de distancia
31:   matDis[:]=np.NaN
32:   savFig=str(nImg+1)+'_images,'+'_umb'+str(u)+'Disc' #Nombre para figura
33:   tic()
34:   for i in range(0,nImg):
35:       #print 'i:'+i
36:       root_dir='D:/Programas/Python/Reconstrusuper/ReconstruccionLaser/Cabeza/'
37:       readimg=root_dir+'img'+str('{num:03d}'.format(num=i+1))+ext
38:       saveurlbin=root_dir+'binaria/img'+str('{num:03d}'.format(num=i))+ext
39:       saveurlgray=root_dir+'gris/img'+str('{num:03d}'.format(num=i))+ext
40:       saveurlcut=root_dir+'corte/img'+str('{num:03d}'.format(num=i))+ext
41:       saveurl2ch=root_dir+'dobleCanal/img'+str('{num:03d}'.format(num=i))+ext
42:       saveurlredpix=root_dir+'centromasa/img'+str('{num:03d}'.format(num=i))+ext
43:       saveurlint=root_dir+'interpolacion/img'+str('{num:03d}'.format(num=i))+ext
44:       img=cv2.imread(readimg)#Carga una imagen
45:       #cv2.imshow("Imagen original", img)
46:       #img=cv2.cvtColor(img,cv2.COLOR_BGR2LAB)
47:       #cv2.imshow("Imagen original", img)
48:       img=img[y1:y2,x1:x2]#Recorta la region de interes
49:       lineinterp=np.zeros([190,180,3],dtype=np.uint8)
50:       #cv2.imshow("Region de interes", img)
51:       #cv2.imwrite(saveurlcut,img)
52:       #Convierte a 2 espacios de color
53:       img[...,c0] = 0
54:       #cv2.imshow("2 Canales", img)
55:       #cv2.imwrite(saveurl2ch,img)
56:       #Pasa a escala de grises
57:       img=cv2.cvtColor(img,cv2.COLOR_RGB2GRAY)
58:       #cv2.imshow("Gris", img)
59:       #cv2.imwrite(saveurlgray,img)
60:       #Convierte en binario
61:       ret,img=cv2.threshold(img,0,255,cv2.THRESH_BINARY+cv2.THRESH_OTSU)
62:       #cv2.imshow("Binario", img)
63:       #guardar los resultados en jpg
64:       #cv2.imwrite(saveurlbin,img)
65:       #Obtiene la posicion donde esta el objeto
66:       line1=np.zeros(np.shape(img))
67:       for posy in range(0,y2-y1):
68:           #suma de fila
69:           row_sum=0
70:           row_sump=0
71:           mean=0.0
72:           for posx in range(0,x2-x1):
73:               #print "(",posx,"),(",posy,")",img[posy][posx]
74:               row_sump+=img[posy,posx]
75:               row_sum+=img[posy,posx]*posx
76:               #print posx,np.float64(posx).dtype,matDis.dtype
77:               if row_sump>0:
78:                   mean=row_sum/row_sump
79:                   #print row_sum," ",row_sump," ",mean
80:                   mean=np.fix(mean)
81:                   matDis[i,posy]=mean+r0
82:                   cp+=1
83:                   line1[posy,int(mean)]=255
84:       #cv2.imwrite(saveurlredpix,line1)
85:       #cv2.imshow("single line", line1)
86:       #print matDis[i,:]
87:       #Espera se oprima esc para siguiente iteración
```

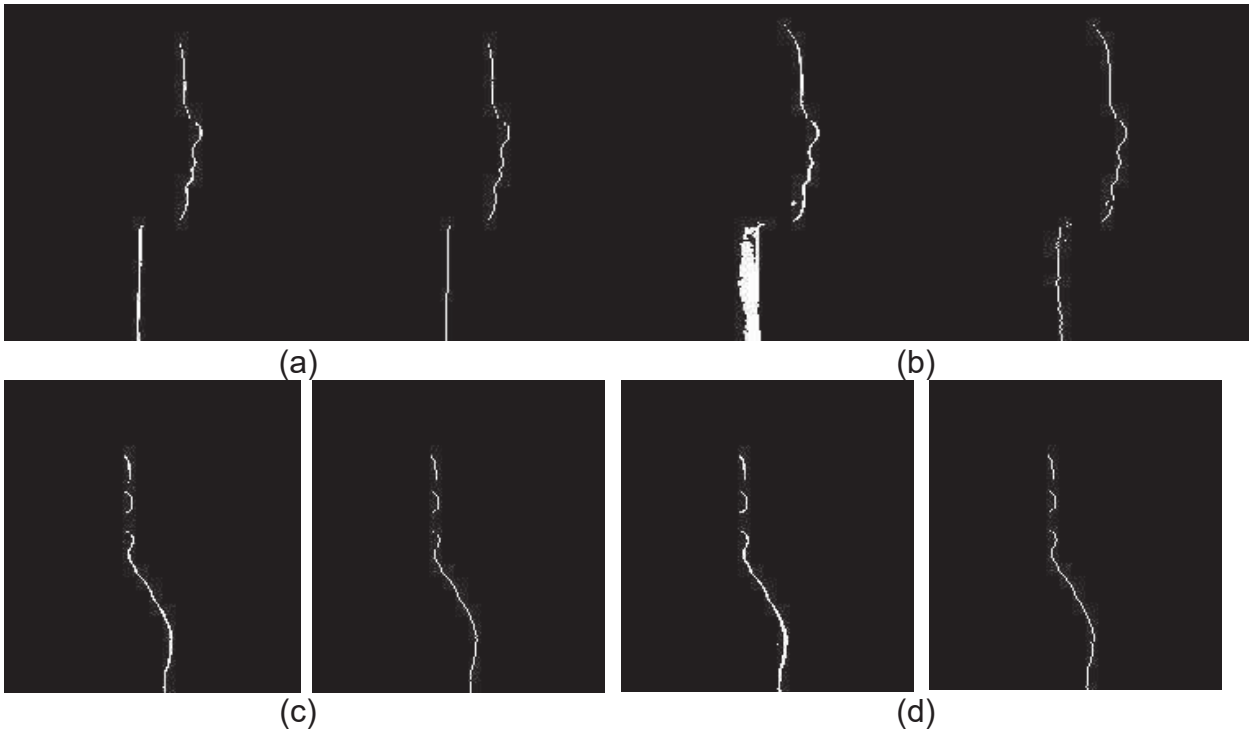
```
88:         cv2.waitKey(0)
89:     #Duplica el primer resultado de la matriz de distancia en la ulitma posicion
90:     matDis[nImg,:]=matDis[0,:]
91:     print "Matriz de distancias final: ",matDis,matDis.shape
92:
93:     #Obtenemos los angulos y se crea la un arreglo con los radianes
94:     degree=360.00/nImg
95:     radian=np.radians(degree)
96:     thetas=np.ones((nImg+1))
97:     for i in range(0,nImg+1):
98:         thetas[i]=radian*(i+1)
99:     thetas=thetas[np.newaxis]
100:    print "Radianes: ",thetas,thetas.shape
101:
102:    #Se crean las matrices para la generacion de la nube de puntos
103:    X=np.zeros((nImg+1,size[1]))
104:    Y=np.zeros((nImg+1,size[1]))
105:    Z=np.ones((nImg+1,y2-y1))
106:    C=np.ones((nImg+1,y2-y1))
107:    #print X,X.shape,thetas.shape
108:
109:    for i in range(0,nImg+1):
110:        for j in range (0,y2-y1):
111:            X[i,j]=(escala*(matDis[i,j]))*((np.cos(thetas[0,i])+dx))
112:            Y[i,j]=(escala*(matDis[i,j]))*((np.sin(thetas[0,i])+dy))
113:    for i in range(0,y2-y1):
114:        Z[:,i]=-(i+1)
115:    toc()
116:
117:    with file('matX.txt', 'w') as outfile:
118:        outfile.write('# Array shape: {0}\n'.format(X.shape))
119:        for data_slice in X:
120:            np.savetxt(outfile, data_slice, fmt='%-7.2f')
121:            outfile.write('# New slice\n')
122:
123:    with file('matY.txt', 'w') as outfile:
124:        outfile.write('# Array shape: {0}\n'.format(Y.shape))
125:        for data_slice in Y:
126:            np.savetxt(outfile, data_slice, fmt='%-7.2f')
127:            outfile.write('# New slice\n')
128:
129:    with file('matZ.txt', 'w') as outfile:
130:        outfile.write('# Array shape: {0}\n'.format(Z.shape))
131:        for data_slice in Z:
132:            np.savetxt(outfile, data_slice, fmt='%-7.2f')
133:            outfile.write('# New slice\n')
134:
135:    matDis2=matDis
136:    matDis2=matDis2[np.newaxis]
137:    np.savetxt('matrizDist.txt', matDis, fmt='%.2f', delimiter='|', newline='\n',
      header='', footer='', comments='# ')
138:    np.savetxt('matrizX.txt', X, fmt='%.2f', delimiter='|', newline='\n', head-
      er='', footer='', comments='# ')
139:    np.savetxt('matrizY.txt', Y, fmt='%.2f', delimiter='|', newline='\n', head-
      er='', footer='', comments='# ')
140:    np.savetxt('matrizZ.txt', Z, fmt='%.2f', delimiter='|', newline='\n', head-
      er='', footer='', comments='# ')

141:    fig=plt.figure()
142:    #fig.suptitle('256 images', fontsize=20)
143:    fig.canvas.set_window_title(savFig)
144:    ax=fig.gca(projection='3d')
145:    #X,Y=np.meshgrid(X,Y)
```

```
146: print "Tamanyo de matricez",X.shape, Y.shape, Z.shape
147: print "Numero puntos: ",cp
148: surf=ax.plot_surface(X,Y,Z, rstride=1, shade='interp', cstride=1, cmap=cm.jet,
149: linewidth=0, antialiased=False)
150:
151: plt.show()
152:
```

6. Resultados

Como resultados, las imágenes mostraron una menor cantidad de ruido en los casos donde se aplica la reducción del ruido. Algunos ejemplos se muestran en la figura 16, donde se aprecia en casos donde el ruido es reducido enormemente como en los casos de la cabeza, el cerdo y el cráneo, y en el caso de la campana llega a existir una ligera mejoría al eliminar un punto cerca de la protuberancia que aparece en la campana en la figura 1. Sin embargo no es del todo infalible, ya que el ruido no es completamente eliminado, además de que llega a existir una ligera pérdida de la información como en la nariz de la cabeza donde se notan algunos puntos faltantes que dejan algunas discontinuidades que no están presentes en la línea de la imagen que no aplicó la discriminación, así como la pérdida en la frente cercana a la punta de la cabeza.

Una posible explicación es que al aumentar la rapidez de los cambios de intensidad en el histograma como aparecen en la figura 13, esto es un decremento de mayor inclinación, facilita la distinción de características en una imagen ya que el contraste es mayor [26], por lo que el tratar de



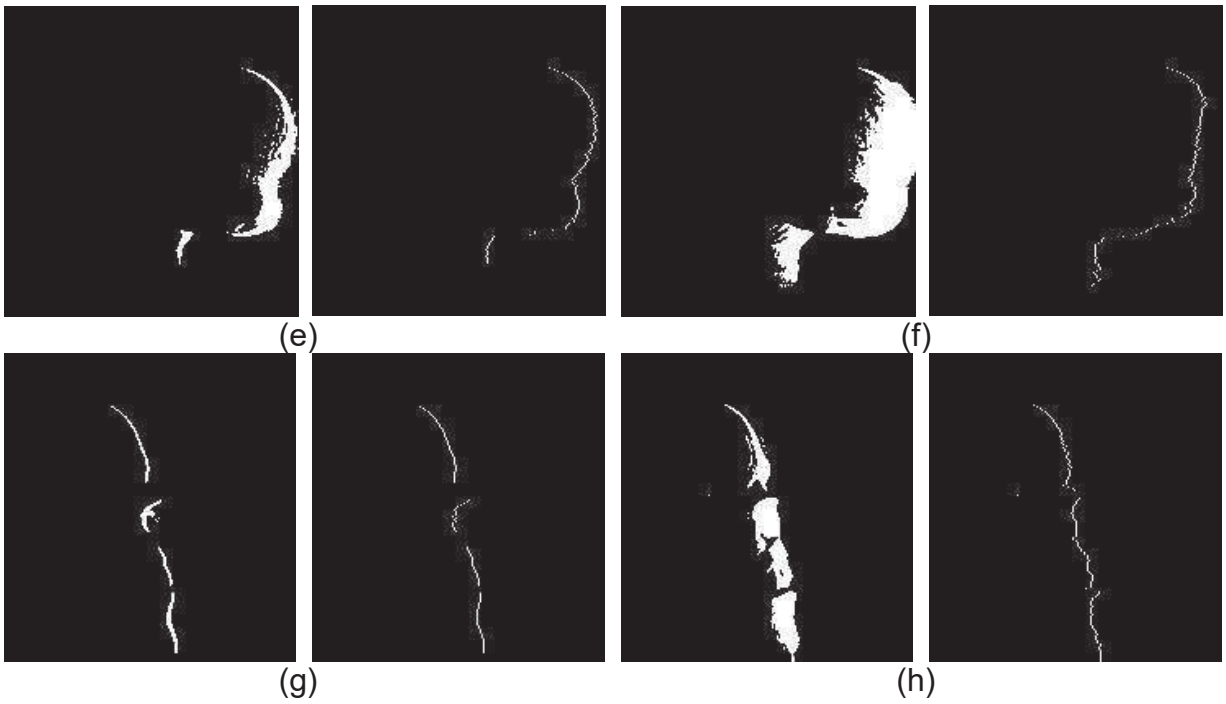
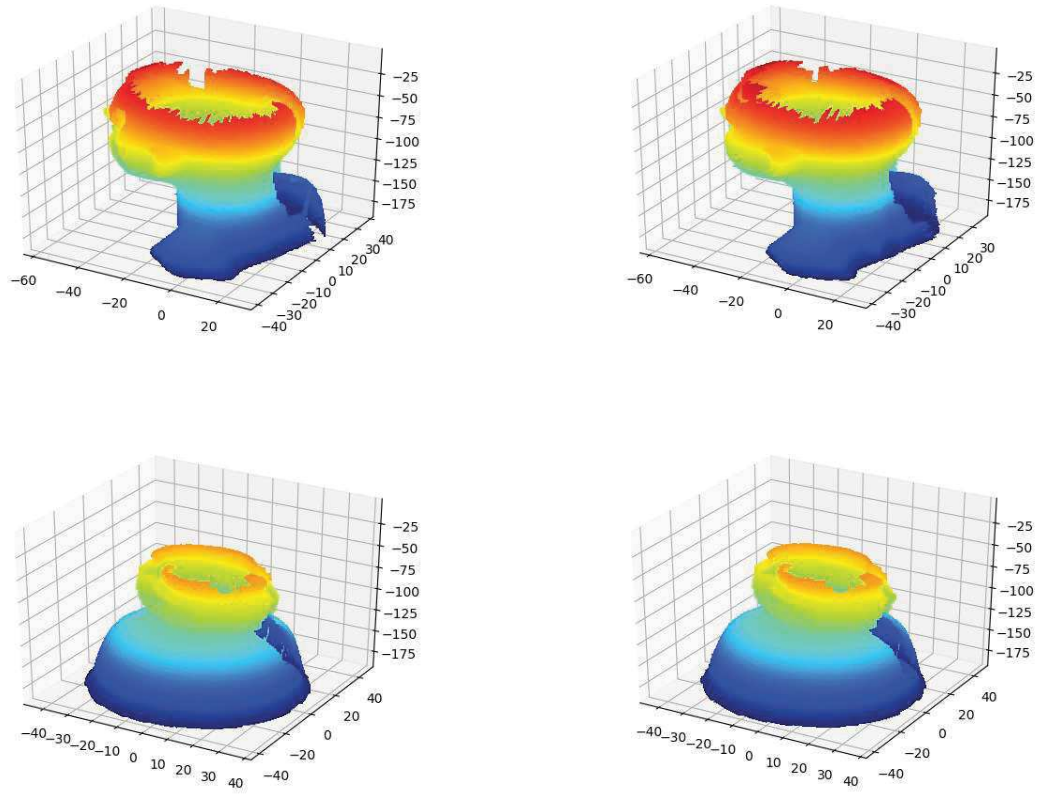


Figura 16: Comparación de binarización y reducción a un píxel. (a) Cabeza con discriminación; (b) Cabeza sin discriminación; (c) Campana con discriminación; (d) Campana sin discriminación; (e) Cerdo con discriminación; (f) Cerdo sin discriminación; (g) Cráneo con discriminación; (h) Cráneo sin discriminación.



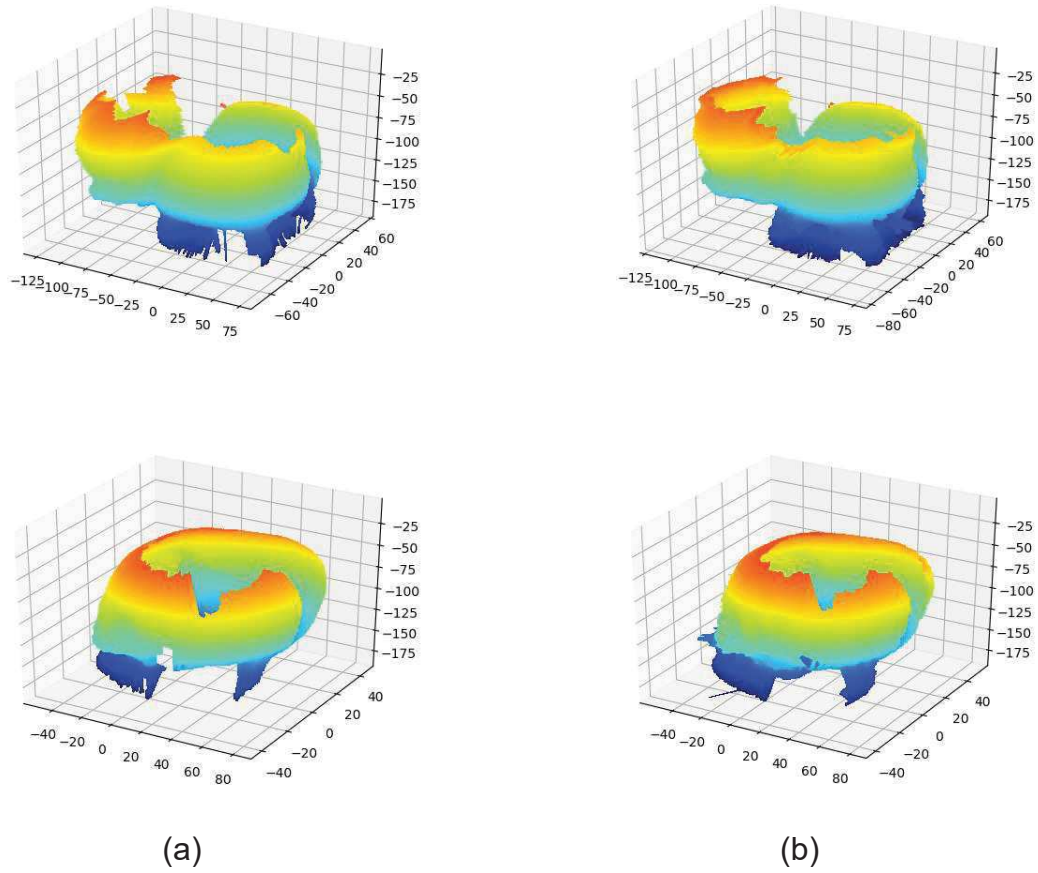


Figura 17: Resultados de reconstrucción. (a) Con discriminación; (b) Sin discriminación.

Las reconstrucciones mostraban digitalizaciones que se asemejan a su contraparte física, sin embargo se encontraron algunas limitaciones en referencia a la librería de Python para la visualización de los modelos 3D. La más notable es la dificultad para manipular la vista una vez reconstruido el objeto, pues este tiende a trabarse y ser muy sensible, por lo que al tratar de hacer una ligera rotación se torna en casi una vuelta, así como por el hecho de no ser instantáneo, no se puede tener un control en el manejo de las vistas, motivo por el cual las imágenes mostradas en la figura 17 son las que aparecen por defecto, mientras que las mostradas en la figura 15 son las mejores vistas que se pudieron obtener para muestra con el método de discriminación. Otro aspecto es que tiende a cortar las partes que estén directamente en el lado derecho de la vista frontal o en la misma vista central dependiendo del tamaño del objeto, por lo que llegan a dar la apariencia de no haber sido reconstruidas.

Tratando de verificar si la discriminación de canales genera un consumo extra que requiere de un poco de tiempo adicional, se midió el tiempo de reconstrucción, desde el momento de carga de imagen hasta el despliegue de la digitalización de las figuras 11 y 13. Y como adición, se contó el número de puntos generados en cada caso para comprobar que tanto podría ser la pérdida de información. Dichos resultados se presentan en la tabla 3.

Basado en los resultados, es posible asumir que hay una pérdida de información por la cantidad de puntos generados, aunque no es posible determinar con exactitud si algunos de los puntos son en realidad, ruido, tal como se muestra en el cráneo sin discriminación de la figura 17 donde se muestran algunas deformaciones no presentes en el objeto físico, notablemente en la base donde una línea está presente y en la parte frontal del cráneo se puede observar una mancha que estaría deformando el objeto si es visto en perfil. Por otra parte se puede encontrar en comparación a cada objeto en contra-

parte al método de discriminación, hay zonas en las que se ven algunos huecos más grandes en contra de las reconstrucciones sin reconstrucción.

Otro aspecto notable fue el tiempo que requirió completar todo el proceso de reconstrucción, con el cual se encontró que la discriminación no parece adicionar tiempo extra, únicamente en el caso de la campana se mostró un tiempo mayor por 5 segundos, sin embargo para el caso del cerdo el resultado fue invertido, mientras que en la cabeza y el cráneo la discriminación sigue el patrón de que requirió tiempo adicional, sin embargo este es bastante despreciable. Destacando que se procesaron un total de 256 imágenes en cada caso.

Tabla 2. Resultados de reconstrucción

	Con discriminación		Sin discriminación	
Objeto	**Tiempo (seg)**	**Puntos**	**Tiempo (seg)**	**Puntos**
Cabeza	34.2739999294	38853	33.8429999352	41236
Campana	40.5290000439	31358	35.3519999981	32281
Cerdo	31.117000103	26883	37.9660000801	32779
Cráneo	31.9400000572	27830	31.5649998188	34945

7. Conclusiones

El método de discriminación de canales produce imágenes con menos ruido, pero a compromiso de una pérdida de información como se puede concluir por la cantidad de puntos generados entre el aplicar el método contra no aplicarlo, sin embargo es de considerar que algunos puntos son inexistentes en el objeto y llegan a ser resultado del ruido mismo. Por ello se considera que se puede usar el canal discriminado para tratar de rellenar las discontinuidades, o bien implementar algún tipo de interpolación que se encargue de ese problema.

También se estaría haciendo pruebas con canales individuales como alternativas siguiendo las pruebas presentadas, así como seguir con las pruebas con el láser azul y encontrar si este es más efectivo.

Se encontró necesario emplear otra librería de visualización para Python o implementarlo en otro lenguaje que permita una mejor visualización de los resultados. También se consideraría exportar los resultados a un formato de modelos 3D como ply u obj y usar una aplicación que permita una mejor visualización de los resultados.

Se ha concluido que el método de discriminación de canales es un método que puede reducir el ruido sin generar carga considerable en el programa, y este se puede implementar fácilmente en cualquier sistema de reconstrucción. El problema de pérdida de información se puede tratar con un método extra que emplea el canal faltante o un método de interpolación.

Referencias

[1] Motavalli, S., Bidanda, B., *"A part image reconstruction system for reverse engineering of design modifications", Journal of Manufacturing Systems,* Volume 10, Número 5, páginas 383-395, 1991.

[2] Domiter, V., Repnik, B., Žalik, B., Sadžak, A., y Rizvić, S., "Surface reconstruction algorithms in cultural heritage digital representation," *2009 XXII International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies*, páginas 1-5, Bosnia, 2009.

[3] Shunwang, X., Zhiyong A., Hui, S., Wubin, F., Lijuan, L. y Shengcai, L., "Laser Line-Scanning Based Customized Shoe-Last System," *2010 International Conference on Electrical and Control Engineering*, páginas 1230-1233, Wuhan, 2010.
[4] Sukvichai, K., Wongsuwan, K., Loraksa, C., y Chantarachit, S., "Simple 3D splint reconstruction using a low cost smart phone line laser 3D scanner," *2018 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*, páginas 1-4, Honolulu, HI, 2018.
[5] Yunardi, R. y Imandiri, A., "Design of The 3D Surface Scanning System for Human Wrist Contour Using Laser Line Imaging," *2018 5th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, páginas 1-5, Semarang, 2018.
[6] Hasanuddin, M., Permana, G., Akbar, I., y Wuryandari, A. "3D scanner for orthodontic using triangulation method," *2015 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, páginas 360-364, Denpasar, 2015.
[7] Yang, Y., Zheng, B., Zheng, H., Wang, Z., Wu, G. y Wang, J. "3D reconstruction for underwater laser line scanning," *2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen*, páginas 1-3, Bergen, 2013.
[8] Yang, Y., Zheng, B., Kan, L., Yu, J., y Wang, J. *"3D color reconstruction based on underwater RGB laser line scanning system", Optik*, Volume 125, Número 20, páginas 6074-6077, 2014.
[9] Deng, J., Chen, B., Cao, X., Yao, B., Zhao, Z., y Yu, J. "3D Reconstruction of Rotating Objects Based on Line Structured-Light Scanning," *2018 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC)*, páginas 244-247, Xi'an, China, 2018.
[10] Aganj, E., Keriven, R., y Pons, J., "Photo-consistent surface reconstruction from noisy point clouds," *2009 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, páginas 505-508, Cairo, 2009.
[11] Sánchez, M., Vidal, V., Arnal, J., y Vidal, A., "*Image Noise Removal on Heterogeneous CPU-GPU Configurations*", *Procedia Computer Science*, Volume 29, páginas 2219-2229, 2014.
[12] Ykhlef, F., Arezki, M., Guessoum, A., y Berkani, D., *Adaptive noise reduction using numerically stable fast recursive least squares algorithm*. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 21, páginas 354 - 374, 2007.
[13] Tsuchida, M., Haseyama, M., y Kitajima, H., "*A Kalman filter using texture for noise reduction in SAR images*". *Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications)*, 86, páginas 21 - 32. 10.1002/ecja.10065, (2003).
[14] Weickert, J., "*Coherence-Enhancing Diffusion Filtering*", *International Journal of Computer Vision*, Volumen 31, Número 2–3, páginas 111–127, 1999.
[15] Ding, Z., Gore, J., y Anderson, A. "*Reduction of noise in diffusion tensor images using anisotropic smoothing"*, *Magnetic Resonance in Medicine*, volumen 53, Número 2, páginas 485-490, 2005.
[16] Netravali, I., Holt, R., y Webb, C., "*Perceptual Denoising of Color Images*", *International Journal of Imaging Systems and Technology*, Volumen 20, Número 3, Páginas 215-222, 2010.
[17] https://opencv.org/
[18] Otsu, N. "*A threshold selection method from gray-level histograms*", *Automatica*, páginas 23-27, 1975.
[19] Danish, M., Ahmad T., Hashim, R., Said, N., Akhtar, M., Mohamad-Saleh, J., Sulaiman, O., "*Comparison of surface properties of wood biomass activated carbons and their application against rhodamine B and methylene blue dye*", *Surfaces and Interfaces*, Volumen 11, páginas 1-13, 2018.
[20] Wang, D., Khosla, A., Gargeya, R., Irshad, H., Beck, A. H., "Deep learning for identifying metastatic breast cancer", arXiv:1606.05718, 2016.
[21] Puri, M., Hoover, S., Hewitt, S., Wei, B., Adissu, H., Halsey, CHC., Beck, J., Bradley, C., Cramer, S., Durham, A., Esplin, D., Frank, C., Lyle, L., McGill, L., Sánchez, M., Schaffer, P., Traslavina, R., Buza, E., Yang, H., Lee, M., Dwyer, J., y Simpson, R. "*Automated Computational Detection, Quantitation, and Mapping of Mitosis in Whole-Slide Images for Clinically Actionable Surgical Pathology Decision Support*". *J Pathol Inform*. 2019 Feb 7;10:4. doi: 10.4103/jpi.jpi_59_18. PubMed PMID: 30915258; PubMed Central PMCID: PMC6396430.
[22] Tu, W., He, S., Yang, Q., y Chien, S. "Real-Time Salient Object Detection With a Minimum Spanning Tree", *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016.

[23] Happy, S., y Routray, A., "Automatic facial expression recognition using features of salient facial patches," en *IEEE Transactions on Affective Computing*, vol. 6, no. 1, 1 Jan.-March, páginas 1-12 2015.
[24] Shi, Y., Li, X., Zhang, X., Wu, H., y Ma, B. "Reversible data hiding: Advances in the past two decades," en *IEEE Access*, vol. 4, páginas 3210-3237, 2016.
[25] Gehan, M., Fahlgren, N., Abbasi, A., Berry, J., Callen, S., Chavez, L., Doust, A., Feldman, M., Gilbert, K., Hodge, J., Hoyer, J., Lin, A., Liu, S., Lizárraga, C., Lorence, A., Miller, M., Platon, E., Tessman, M., y Sax, T. "*Plantcvv2: image analysis software for high-throughput plant phenotyping*" PeerJ 5 (2017). https://doi.org/10.7717/peerj.4088.
[26] Frei, W. "*Image enhancement by histogram hyperbolization*", Computer Graphics and Image Processing*, Volumen 6, Número 3, páginas 286-294, 1977.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 38, pp.483 – 494, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Implementación de Filtro de Kalman para el Sistema de Control Indirecto de Fuerza en un Servomotor

Ramírez Villa Goretti, Traslosheros Michel Alberto y Torres Rivera Moisés

Universidad Aeronáutica en Querétaro
goretti.ramirez@unaq.edu.mx

Resumen

Derivado de la necesidad de los sistemas robóticos por mejorar sus capacidades sensoriales y su interacción con el entorno se retoma la propuesta de implementación de un sistema de control para un servomotor de radiocontrol, lo anterior desde la perspectiva de realizar un control indirecto de fuerza-posición.

A partir de un modelo obtenido por identificación paramétrica se hace la propuesta de diseño de un controlador PD, acompañado de un observador de estado basado en el algoritmo del filtro de Kalman. Se plantea que el observador mejore la medición indirecta de fuerza para el sistema. Finalmente, se realiza una comprobación de funcionamiento y de resultados por medio de simulación en Matlab.

Palabras clave: Control de fuerza, filtro de Kalman.

1. Introducción

La diversidad de aplicaciones en las que los sistemas robóticos son empleados ha impulsado un interés en mejorar sus capacidades, esto se ve reflejado en la necesidad de mejorar los algoritmos que los controlan y por su puesto implementar teorías de control que les permitan tener conocimiento y respuesta ante los estímulos externos definidos por el ambiente en el que operan.

El control de una simple variable como la posición del objeto o las fuerzas de contacto no permite cumplir con los requerimientos tanto de posición como de fuerza, mismos que deben ser especificados en tareas donde el ambiente restrictivo, las perturbaciones e incluso errores en el modelado pueden causar incremento en la fuerza de contacto, que en última instancia conduce a un comportamiento inestable durante la interacción [1].

El uso de retroalimentación de fuerza fue concebido para asistir al operador humano en manejo remoto de objetos con un manipulador esclavo, además de permitir a cualquier sistema operar en ambientes no estructurados. De ahí que su principal aplicación se a sistemas robóticos, los cuales requieren poseer capacidades sensoriales mejoradas, que les permitan manipular el contacto físico entre el robot y el ambiente en el que trabajan [2].

Las tareas de contacto son caracterizadas por una interacción dinámica entre el robot y el ambiente que puede ser inercial (como al empujar bloques), disipativa, (como al deslizarse en una superficie con fricción) o elástica (como al empujar en una pared elástica). El control de interacción se vuelve crucial para la ejecución exitosa donde el efector final del robot tiene que manipular un objeto y relacionarse con el medio ambiente [3].

Existen diferentes perspectivas de control de fuerza, sin embargo, este artículo se centrará en el control indirecto de fuerza de un servomotor de radio control. Debido al uso de este tipo de actuadores para desarrollar vehículos no tripulados.

El control indirecto de fuerza no requiere en principio, mediciones de las fuerzas de contacto y momentos ya que logra el control de la fuerza a través del control de movimiento, sin cierre explícito de un bucle de retroalimentación de fuerza.

Si un sensor de fuerza o torque está disponible, entonces las mediciones de fuerza pueden ser utilizadas en el esquema de control para lograr un comportamiento lineal y desacoplado. Para lograrlo, generalmente es conveniente asignar una relación dinámica entre las variables de posición y fuerza, además de comandar y controlar una sola variable.

Dicha perspectiva ha sido explorada por muchos investigadores; y fueron identificadas dos posibilidades: el control de impedancia y control de admitancia. Un robot manipulador bajo control de impedancia o admitancia es descrito por un sistema equivalente de masa-resorte-amortiguador con parámetros ajustables. Esta relación es una impedancia si el control del robot reacciona a la desviación de movimiento generando fuerzas, y corresponde a admitancia si el control del robot reacciona a la interacción de fuerzas imponiendo una desviación del movimiento deseado [4].

Si una trayectoria de fuerza es dirigida y la relación entre el movimiento del efector y desviaciones de la fuerza asignada es dada; el enfoque es llamado control de admitancia. El control de admitancia es generado por un desarrollo dual. La suposición en este caso es que el ambiente es construido por sistemas elásticos y disipativos, los cuales son descritos como impedancias.

Por otra parte, el enfoque de control de admitancia presenta capacidades de control de fuerza en bucle cerrado cuando está en contacto con un entorno rígido y con entornos elásticos o disipativos (tales como empujar o seguir una superficie compatible), esto resulta en el alojamiento de fuerzas de interacción no deseadas y hace que el enfoque sea atractivo en todas aquellas tareas en las que el movimiento del efector final debe ser guiado por el entorno. Dedicada al caso de control de imitación, el caso de control de admisión, el enfoque de admitancia permite capacidades de control de posición de bucle abierto en el espacio libre.

Cuando la trayectoria de posición es dirigida y en adición la relación entre las fuerzas de iteración y desplazamientos de la trayectoria asignada es dada; este enfoque es llamado control de impedancia. El enfoque de control de impedancia permite capacidades de control de posición de bucle cerrado en el espacio libre y en un entorno inercial (por ejemplo, cuando se transporta una carga útil); esto hace que el enfoque sea atractivo en todas aquellas tareas en las que el efector final debe imponer su movimiento al ambiente. Si ocurre el contacto con un ambiente rígido, el acercamiento de la impedancia ofrece las capacidades de control de la fuerza del lazo abierto; De hecho, un punto de ajuste de posición proporciona una fuerza de contacto estable cuyo valor depende de la rigidez del entorno [5].

El control de impedancia asume que, para casi todas las tareas de manipulación, el ambiente al menos contiene inercia y restricciones cinemáticas; por ejemplo, sistemas que aceptan entradas de fuerza y producen salidas de posición.

Dos sistemas de interacción pueden complementarse físicamente uno al otro, a lo largo de cualquier grado de libertad si uno es admitancia el otro debe ser impedancia. Mas aún, si el ambiente es admitancia, el manipulador debe ser impedancia.

Para desarrollar el controlador propuesto en este artículo se utiliza una relación entre las variables de posición y fuerza, obteniendo una aproximación de la ultima realizando mediciones de corriente en el motor y relacionando dicha corriente al torque. Como se puede observar se tiene una medición indirecta de la fuerza y eso podría generar errores en la respuesta del sistema de control,

por ello se propone agregar un observador utilizando el algoritmo de filtro de Kalman que permita predecir y corregir el error en el sistema y mejorar la respuesta del motor.

El filtro es un procedimiento matemático que opera por medio de un mecanismo de predicción y corrección. En esencia este algoritmo pronostica el nuevo estado a partir de su estimación previa añadiendo un término de corrección proporcional al error de predicción, de tal forma que este último es minimizado estadísticamente [6].

El interés de proponer un observador para nuestro sistema de control implementando el filtro de Kalman radica en que, para lograr un mejor desempeño en la estimación, el filtro de Kalman considera el ruido del sistema y el ruido de la medición. Así mismo los ruidos utilizados por el filtro sirven para neutralizar los ruidos que afectan al sistema de control durante su funcionamiento.

La propuesta del sistema de control será presentada en la siguiente sección, donde se parte de un modelo obtenido mediante identificación de un motor de radio control para diseñar el controlador de fuerza-posición y posteriormente se obtendrá una relación para implementar el filtro de Kalman. Finalmente se mostrarán los resultados del sistema propuesto simulado en Matlab, para presentar las conclusiones y la perspectiva del trabajo futuro.

2. Diseño del sistema de control

Antes de aplicar una estrategia de control habrá que tener la descripción detallada del sistema, ya que cualquier método de control dejará de ser útil cuando no ha sido diseñado tomando en cuenta las características intrínsecas del proceso. Si se ignora la dinámica interna el resultado puede conducir a situaciones que en el mejor de los casos son solo no deseadas. Por lo cual es necesario realizar el análisis del sistema dinámico, el cual puede ser dividido en cuatro principales etapas, la representación de los fenómenos, la generación de las soluciones, la búsqueda de las relaciones estructurales y el control o modificación [7].

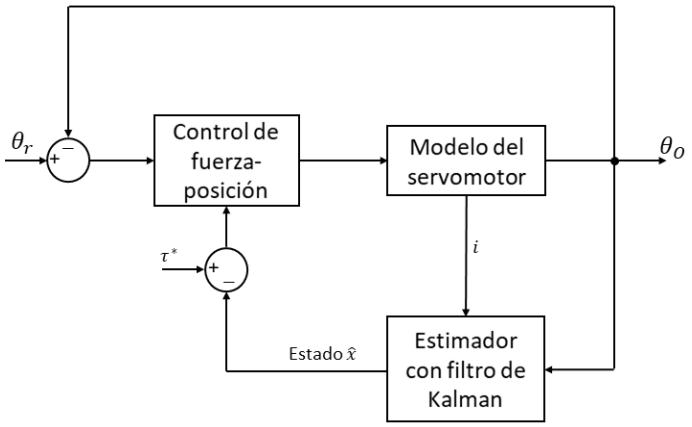


Figura 1. Diagrama con estimador de estado para la corriente utilizando el filtro de Kalman.

Donde:

$\hat{x}$	Estado estimado
θ_r	Posición de referencia
θ_o	Posición de salida
i	Corriente del motor
τ	Torque del motor

Como paso previo a la identificación se requiere obtener una serie de datos de entradas y salidas del sistema, mismos que fueron adquiridos para realizar la identificación del sistema

implementando un algoritmo de mínimos cuadrados. La función de transferencia en tiempo discreto del sistema se muestra en la ecuación 1, dicha ecuación relaciona la posición angular de referencia (θ_r) con la posición angular de salida (θ_o).

$$G(z) = \frac{0.003914z + 0.0202}{z^2 - 0.7507z - 0.2425} \quad (1)$$

Con esta funcion es posible obtener el diseño del controlador, que será una parte del sistema de control que se propone en este articulo y que se desarrolla en la siguiente subsección.

Sin embargo, como se ha mecionado debido a la medición indirecta de fuerza, existen errores en la retroalimentación de dicha variable, mismos que se planean ajustar proponiendo un esquema de control como el que se muestra en la figura y que se explicará en el apartado 2.2.

2.1 Diseño de controlador PD de fuerza

El controlador parte de la función de transferencia mostrada en la ecuación 1, que modela el sistema del motor de radio control, para el diseño es necesario tomar en cuenta las características del sistema y sus condiciones de estabilidad.

La estabilidad en tiempo discreto puede determinarse por medio de las localizaciones de los polos en lazo cerrado en el plano z, o por las raíces de la ecuación característica como se muestra en la ecuación 2.

$$P(z) = 1 + GH(z) = 0 \quad (2)$$

De lo anterior se puede sustituir:

$$F(z) = G(z)H(z) \quad (3)$$

Por lo cual:

$$F(z) = -1 \quad (4)$$

Dado que F(z) es una cantidad compleja, la ecuación anterior se puede dividir en dos ecuaciones al igualar primero los ángulos y las magnitudes para obtener la condición de ángulo que se muestra en la ecuación 5, así como la condición de magnitud mostrada en la ecuación 6.

$$\angle F(z) = \pm 180°(2k + 1) \quad k = 0,1,2, \ldots, \quad (5)$$

$$|F(z)| = 1 \quad (6)$$

Por otro lado, las características deseables del sistema como lo son el factor de amortiguamiento relativo (ζ) y el tiempo de asentamiento (t_s).

El factor de amortiguamiento relativo es el cociente entre el amortiguamiento real y el amortiguamiento crítico. Excepto para ciertas aplicaciones en las que no se pueden tolerar oscilaciones, es conveniente que la respuesta transitoria sea suficientemente rápida y amortiguada. La constante de amortiguamiento para una respuesta transitoria conveniente de un sistema de segundo orden, el factor de amortiguamiento relativo debe estar entre 0.4 y 0.8. Valores pequeños de ($\zeta <$

0.4) producen un valor de la sobre elongación excesivo en la respuesta transitoria, y un sistema con un valor grande de ($\zeta > 0.8$) responde con lentitud.

Por otro lado el tiempo de asentamiento se refiere al tiempo que la curva de respuesta requiere para alcanzar y mantenerse en un rango alrededor del valor final con una magnitud especificada por el porcentaje absoluto del valor final (habitualmente 2% o 5%) [8]. El criterio para fijar el porcentaje de error a utilizar depende de los objetivos de diseño, en este caso se espera que el tiempo de asentamiento sea mínimo el tiempo de respuesta de la señal de entrada del motor, que corresponde a 0.3ms.

Con los datos anteriores es posible realizar el diseño del controlador y obtener los valores de frecuencia natural no amortiguada (ω_n), *frecuencia natural amortiguada* (ω_d) y frecuencia de muestreo (ω_s):

$$\omega_n = \frac{4}{t_s \zeta} = 26.66 \frac{rad}{s} \quad (7)$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} = 23.094 \quad (8)$$

$$\omega_s = \frac{2\pi}{T} = 2094.4 \quad (9)$$

Donde:

ζ Factor de amortiguamiento relativo
T Periodo

Para encontrar los polos dominantes (z_d) deseados, se obtiene la magnitud y el ángulo del polo en el dominio z, pasando su representación a número complejo (ecuación 10):

$$z_d = 0.0397 - 0.0568i \quad (10)$$

Por otro lado, la ecuación 11 define a un controlador PD en tiempo discreto:

$$G_{PD} = K_p + \frac{K_d}{T}(1 - z^{-1}) \quad (11)$$

Ya que se conoce que el controlador se conforma por un cero real, se procede a determinar su ubicación mediante el lugar geométrico de las raíces.

Como paso inicial, se tendrán que ubicar los polos y ceros en el eje imaginario, esto es el cero c_1 y los polos p_1 y p_2 definidos por la función de transferencia dada en la ecuación 1. Como ya también se tienen las especificaciones y el punto donde se desea se encuentren los polos dominantes, este se ubica en el plano complejo como punto de prueba.

El siguiente paso será calcular el ángulo entre cada cero y polo respecto al punto de prueba y ver su aportación. El aporte angular de cada polo y cero es posible calcularlo geométricamente con las coordenadas de la parte real e imaginaria de cada punto. Así para el cero del sistema se tendrá:

$$\angle c_1 = tan^{-1} \frac{I_m(z_d) - I_m(c_1)}{|Real(z_d)| + |Real(c_1)|} = 1.1952 \quad (12)$$

Utilizando el mismo método para los polos del sistema se tendrá:

$$\angle p_1 = 11.328° \qquad \angle p_2 = 176.595° \quad (13)$$

Una vez obtenidas las aportaciones angulares individuales de cada raíz se procede a calcular la aportación general en el punto deseado y la deficiencia angular

$$\angle F(z) = 1.1952° - 11.328° - 176.5956° = -186.7284° \quad (14)$$

$$Deficiencia\ angular = \angle F(z) + 180° = -6.7284° \quad (15)$$

Únicamente resta calcular la parte real del cero a partir del ángulo obtenido en la ecuación anterior.

$$Real\ (c_d) = \frac{0.0568}{\tan(6.7284)} - 0.0397 = -0.4417 \quad (16)$$

De esta forma se logra ubicar el polo que cumple con las especificaciones definidas y para encontrar la ganancia total del controlador se hará uso de la condición de magnitud como se muestra a continuación:

$$|F(z)| = |KG(z)H(z)| = \left|(0.003914K)\frac{(z+0.4417)(z+2.68267)}{(z-0.99453)(z+0.24383)}\right| = 1 \quad (17)$$

Para encontrar la ganancia K será necesario evaluar la condición de magnitud en el punto de prueba, es decir, en z_d =0.5158+0.4281i, como muestra la ecuación 18.

$$\left|(0.003914K)\frac{(z+0.4417)(z+2.68267)}{(z-0.99453)(z+0.24383)}\right|_{z_d=0.5158+0.4281i} = 1 \quad (18)$$

Evaluando en el punto y despejando K de anterior se obtiene su valor el cual es K =77.2, lo que completa el diseño del controlador PD

$$G_{PD} = 77.2(z+0.4417) \quad (19)$$

2.2 Implementación de observador con filtro de Kalman

Retomando la información obtenida en la sección anterior, es posible observar como la medición de la corriente se veía afectada por ruido que podría afectar en la respuesta del controlador propuesto, por lo tanto, se propone agregar al sistema un observador en el cual se implemente el filtro de Kalman, que optimice la medición de corriente permitiendo una mejor aproximación al valor de corriente en operación y una mejor respuesta del controlador ante fuerzas externas como se muestra en la Figura 1.

El filtro de Kalman funciona por medio de un mecanismo de proyección y corrección al pronosticar el nuevo estado y su incertidumbre y corregir la proyección con la nueva medida. Esto lo hace capaz de estimar las variables de estado que son casi imposibles de medir de forma directo o cuyo costo de medición resulta muy elevado. El filtro de Kalman tiene una mejor respuesta dinámica comparada con otros observadores, en tanto que a estimación de las variables de estado empleando el filtro de Kalman depende especialmente de los términos de la predicción y de la corrección, además de la exactitud de la copia del sistema [9].

Las ecuaciones que se utilizan para derivar el filtro de Kalman se pueden dividir en dos grupos: las que actualizan el tiempo o ecuaciones de predicción y las que actualizan los datos observados o ecuaciones de actualización. Las del primer grupo son responsables de la proyección del estado al momento *t* tomando como referencia el estado en el momento *t-1* y de la actualización intermedia de la matriz de covarianza del estado. El segundo grupo de ecuaciones son responsables de la

retroalimentación, es decir, incorporan nueva información dentro de la estimación anterior con lo cual se llega a una estimación mejorada del estado.

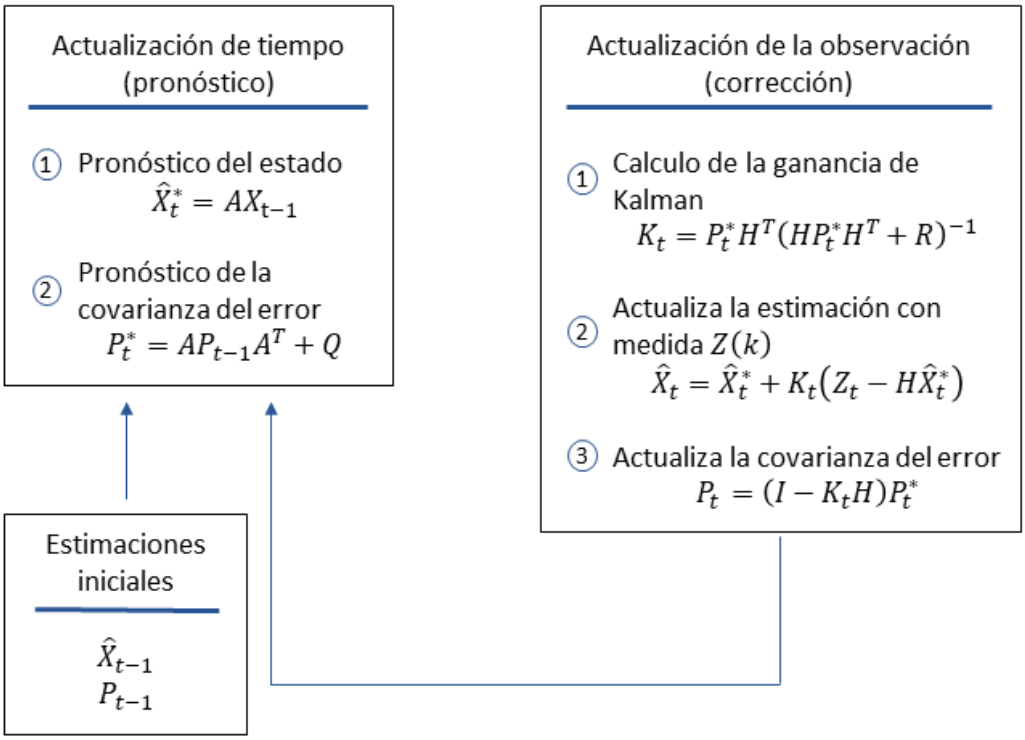


Figura 2. Proceso de cálculo para algoritmo de filtro de Kalman [10].

Donde:

$\hat{x}$	Estado estimado
F	Matriz de transición de estados
u	Variables de control
B	Matriz de control
P	Matriz de varianza del estado
Q	Matriz de varianza del proceso
y	Variables medidas
H	Matriz de mediciones
K	Ganancia de Kalman
R	Matriz de varianza de mediciones

Las ecuaciones que actualizan el tiempo pueden también ser pensadas como ecuaciones de pronóstico, mientras que las ecuaciones que incorporan nueva información pueden considerarse como ecuaciones de corrección. Efectivamente, el algoritmo de estimación final puede definirse como un algoritmo de pronóstico-corrección para resolver numerosos problemas. Así el filtro de Kalman funciona por medio de un mecanismo de proyección y corrección al pronosticar el nuevo estado y su incertidumbre y corregir la proyección con la nueva medida. Este ciclo se muestra en la Figura 2.

A partir de lo anterior se desarrolla el algoritmo de filtro de Kalman en Matlab para los datos obtenidos de corriente con los muestreos de prueba, con lo cual se obtiene una estimación de los valores de corriente en función de la referencia (entrada al sistema). Para lograrlo es necesario hacer definir un modelo que relacione las variables de nuestro sistema, por lo cual retomamos las ecuaciones generales del modelo de un motor (ecuaciones 20 y 21), sin embargo, serán expresadas en función de la posición, θ que expresa el desplazamiento angular del eje del motor.

$$R_a i + L_a \frac{di}{dt} + K_b \frac{d\theta}{dt} = V_{in} \quad 20$$

$$J_m \frac{d^2\theta}{dt^2} + B_m \frac{d\theta}{dt} = K_t i \quad 21$$

Donde:

θ	Posición
i	Corriente
V_{in}	Voltaje de entrada
R_a	Resistencia de armadura
L_a	Inductancia de armadura
K_b	Constante de fuerza contraelectromotriz
K_t	Constante de torque
J_m	Momento de Inercia del Motor
B_m	Coeficiente de fricción viscosa del motor

Se sabe que mientras la armadura del motor se encuentre girando se inducirá una tensión definida como fuerza contraelectromotriz e_b, para un flujo constante esta fuerza será:

$$e_b = K_b \frac{d\theta}{dt} \quad 22$$

Suponiendo que el motor se mantiene en una posición constante y en condiciones iniciales, donde no habrá movimiento $e_b = 0$, por lo cual la ecuación 20 a tendrá la siguiente forma:

$$R_a i + L \frac{di}{dt} = V_{in} \quad 23$$

Suponiendo que todas las condiciones iniciales son cero y aplicando la transformada de Laplace se tendría:

$$(L_a s + R_a) I(s) = V_{in} \quad 24$$

Así mismo considerando el sistema descrito como un servomotor, el voltaje V_{in}dependerá de la información del controlador. Asumiendo que este último es un controlador PD, el voltaje V_{in} podrá expresarse como:

$$V_{in} = K_p(e) + K_d(\dot{e}) \quad 25$$

Donde:

K_p	Constante proporcional
K_d	Constante derivativa

Donde el error es la diferencia entre la posición de referencia (θ^*) y la posición medida θ es:

$$e = \theta^* - \theta \quad 26$$

Mientras que la posición expresada en tiempo discreto sería:

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \dot{\theta}\Delta T \quad 27$$

Por lo expuesto en la ecuación 25, la corriente se podría expresar como sigue:

$$I(s) \approx \frac{K_p}{L_a s + R_a} e + \frac{K_d}{L_a s + R_a} \dot{e} \quad 28$$

Como se puede observar la corriente se encentra en función del error, por lo cual es de interés definir el error en el tiempo (k+1) utilizando las ecuaciones 21 y 22.

$$e_{k+1} = e_k + \dot{e_k} \Delta T \quad 29$$

Adicionalmente se puede decir que la derivada de dicho error solo dependerá del cambio en el error anterior y suponiendo las condiciones iniciales cero se tendrá:

$$e_{k+1} = \dot{e_k} \Delta T \quad 30$$

Finalmente, las ecuaciones 24 y 25 pueden ser expresadas como:

$$\begin{bmatrix} e_{k+1} \\ \dot{e}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_k \\ \dot{e}_k \end{bmatrix} \quad 31$$

La ecuación anterior corresponde a la matriz de transición de estados F_t que describirá el sistema a observar mediante el filtro de Kalman. Para desarrollar el algoritmo de filtro de Kalman es necesario adicionalmente definir las matrices Q, H, R y P. La matriz Q define la matriz de varianza del proceso, asumiendo que el ruido en el proceso solo afectará a la posición θ, solo será afectado el error e_k y la matriz Q en tiempo continuo se muestra en la ecuación 32.

$$Q = \begin{bmatrix} q_f & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 32$$

Donde q_f es el ruido del proceso.

A partir de esta ecuación es posible calcular la covarianza del ruido y expresarla en tiempo discreto con la siguiente fórmula:

$$Q(\Delta t) = \int_0^{\Delta t} e^{A\tau} Q e^{A^T \tau} d\tau \quad 33$$

Donde:

$$e^{A\tau} Q e^{A^T \tau} = \begin{bmatrix} q_f & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 34$$

$$Q(\Delta t) = \begin{bmatrix} \Delta t q_f & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 35$$

Así mismo la matriz de varianza del estado puede describirse como sigue:

$$P = \begin{bmatrix} p_l & p_{lf} \\ p_{lf} & p_f \end{bmatrix} \quad 36$$

Donde el subíndice indica la varianza relativa y p_{lf} es la covarianza, además la matriz P debe ser simétrica. Como no se tiene conocimiento de los estados iniciales, se supone una varianza definida por una matriz simétrica y por simplicidad se propone:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

La consideración a tomar en cuenta para la matriz H es saber cuál es la variable que se está midiendo, en este caso al conocer la posición de referencia θ^* y la posición final θ, se puede decir que la variable que medimos es e, mientras que $\dot{e}$ no es medido y la matriz de mediciones será:

$$R = \begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (38)$$

Donde σ^2 es la desviación estándar de las mediciones, por lo cual:

$$\sigma^2 = E[(X - \mu)^2] \quad (39)$$
$$\sigma^2 = 0.3350$$

Y la matriz de varianza de las mediciones quedará como se muestra a continuación.

$$R = \begin{bmatrix} 0.335 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

3 Resultados

Con los datos desarrollados anteriormente, es posible implementar el filtro de Kalman para los datos medidos de corriente, la respuesta del algoritmo se muestra en la Figura 3. Este algoritmo permite hacer una simulación del sistema con el estimador de estado implementado por medio del filtro de Kalman, como se muestra en el diagrama de la Figura 4, la simulación se realiza en Simulink. Como se puede observar al sistema se le agrega ruido blanco para simular una situación de perturbaciones externas, luego se implementa el programa desarrollado para estimar los datos de la medición de corriente que se retroalimentan al controlador de fuerza-posición. En la Figura 5 se muestran los datos obtenidos de la simulación del sistema de control con estimación y retroalimentación de corriente, se puede ver como estos datos de salida no presentan la misma forma exacta que los datos muestreados, esto es debido a la aproximación del modelo. Sin embargo, los datos presentan un ajuste con respecto de lo que supondría realizar la retroalimentación con los datos y el ruido.

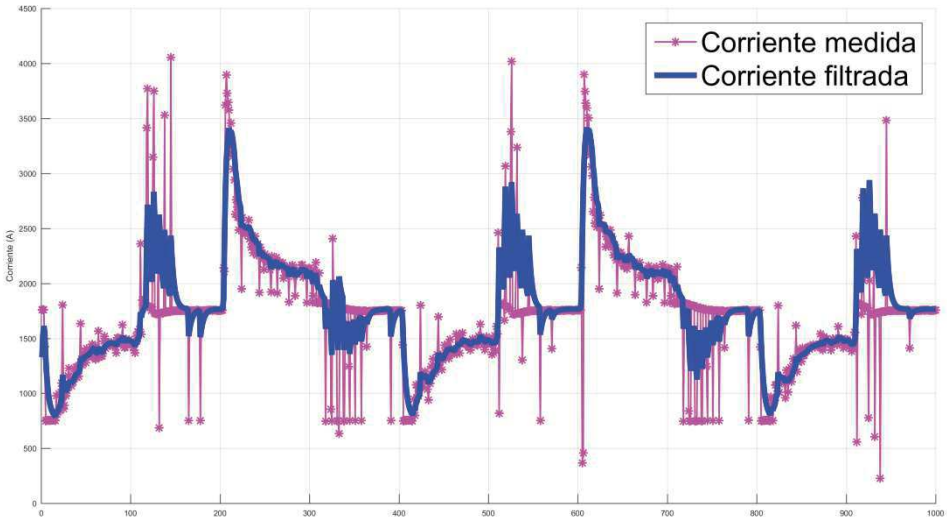


Figura 3. Respuesta a algoritmo de filtro de Kalman para datos muestreados.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 38, pp.483 – 494, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

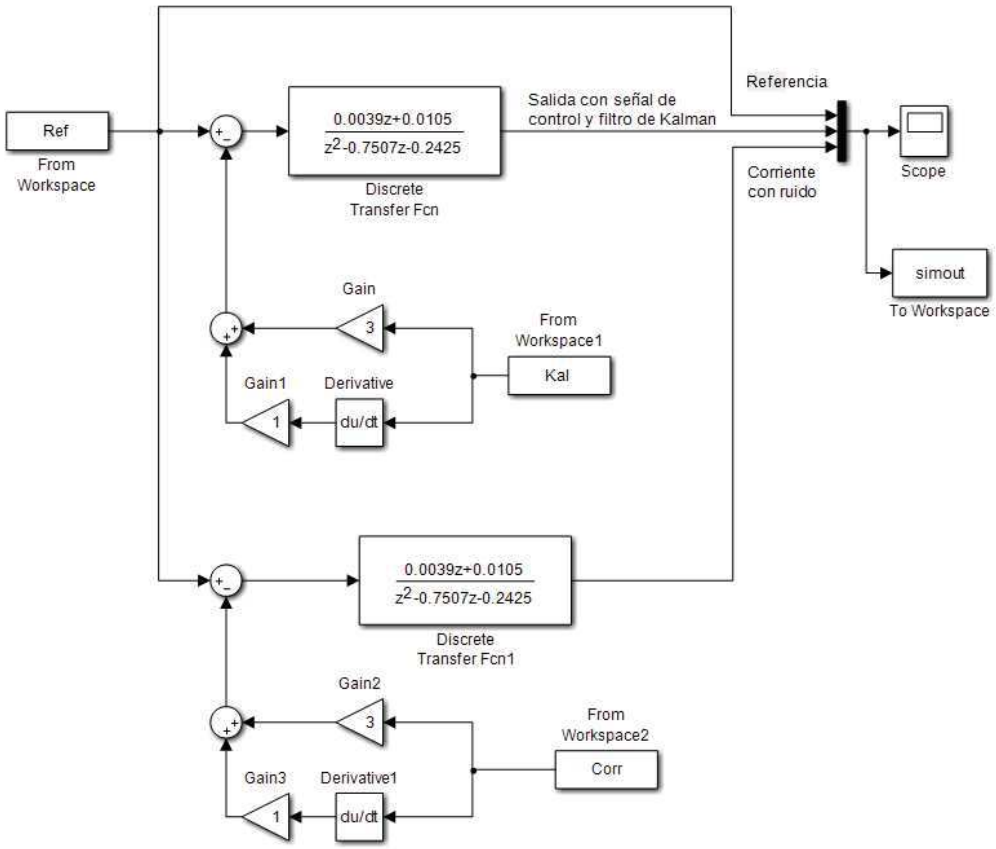


Figura 4. Diagrama de simulación de estimación de estado para sistema de control de fuerza-posición del servomotor utilizando el filtro de Kalman.

Como se puede observar la estimación de estado por medio de la implementación de un algoritmo de filtro de Kalman mejoraría la medición de corriente permitiendo una mejor respuesta del controlador de fuerza-posición.

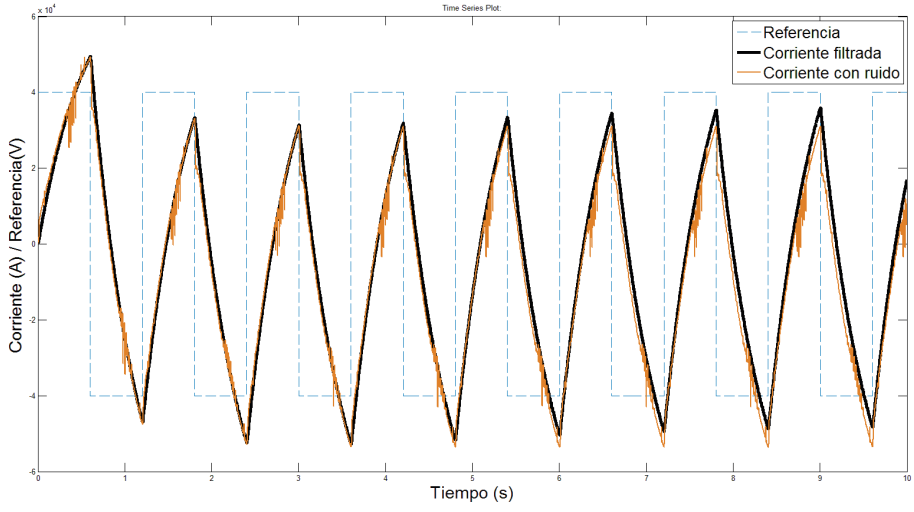


Figura 5. Comparación de medición y retroalimentación de corriente con perturbaciones y con estimación de estado por medio de filtro de Kalman.

Para implementar el ajuste al sistema de control incluyendo el filtro de Kalman como se ha mostrado en este apartado, se deberán hacer algunas consideraciones con respecto al sistema identificado, ya que aún existen desviaciones debido al modelo, que tendrían que ajustarse en el algoritmo del filtro de Kalman.

En esta sección solo se pretendía hacer una contribución para mejora del sistema propuesto que permita una perspectiva futura del problema planteado.

4 Conclusiones

Una de las ventajas del control de fuerza es evitar situaciones que pongan en riesgo el sistema, o que generen la ruptura de alguna de las partes móviles. Este inconveniente se puede superar gracias a que se asegura un comportamiento compatible durante la interacción. En este artículo se ha propuesto un sistema de control que permita ajustar la respuesta del actuador dependiendo de las variables de posición y fuerza retroalimentadas.

Adicionalmente se ha propuesto hacer una medición indirecta de fuerza utilizando la relación que existe entre el torque del motor y su corriente, para mejorar dicha medición se propuso un observador de estado, ajustando el algoritmo de filtro de Kalman para una simplificación del modelo general de un motor de corriente directa. Los resultados en simulación muestran que la medición de corriente ajusta el error y se logra un seguimiento de la posición deseada al motor, tomando en cuenta al mismo tiempo la retroalimentación de fuerza.

Con lo anterior se puede concluir que la propuesta del sistema de control puede ser utilizada para diferentes sistemas que requieran tomar en cuenta las características del entorno y responder con respecto de las fuerzas que se generan en el ambiente al que se enfrente.

Referencias

[1] D. J. Ostry and A. G. Feldman, “A critical evaluation of the force control hypothesis in motor control,” *Exp. Brain Res.*, vol. 153, no. 3, pp. 275–288, Dec. 2003.
[2] J. De Schutter, H. Bruyninckx, W.-H. Zhu, and W. Mark, “Force control: a bird’s eye view,” *Lect. Notes Control Inf. Sci.*, vol. 230, pp. 1–17, 1998.
[3] J. D. S. Luigi Villani, “Force Control,” in *Robotics Foundations*, 2008, pp. 161–185.
[4] E. A. Erlbacher, “Force control basics,” *Ind. Robot An Int. J.*, vol. 27, no. 1, pp. 20–29, Feb. 2000.
[5] J. N. Pires and T. Godinho, “Control difuso de fuerza en robótica industrial,” vol. 10, no. 3, pp. 55–62, 2008.
[6] Á. Solera Ramírez, “El filtro de kalman,” San José, Costa Rica, 2003.
[7] D. G. Luenberger, *Introduction to Dynamic Systems: Theory, Models, and Applications*. 1979.
[8] K. Ogata, *Discrete-Time Control Systems*, TKM Produc. Minnesota: Prentice Hall, 1996.
[9] B. Elefilali, “Utilización del filtro de Kalman como estimador de la velocidad en el control vectorial de motores de inducción,” Instituto Politécnico Nacional, 2001.
[10] G. Welch and G. Bishop, “An Introduction to the Kalman Filter.” University of North Carolina, Chapel Hill, 2001.
[11] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, Quinta edi. Madrid, España: Prentice Hall, 2010.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 39, pp.495 – 504, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Diseño y Simulación de Banco de Pruebas para Sistema PVTOL

Torres Rivera Moisés, Angeles Alpirez Erik Alberto, Ramírez Villa Goretti y Traslosheros Michel Alberto

Universidad Aeronáutica en Querétaro.
moises.torres@unaq.edu.mx

Resumen

Uno de los desafíos a los que hace frente el diseño de vehículos aéreos no tripulados (UAV), es el diseño de controladores de posición que permitan su respuesta en tiempo real y mejoren sus características de operación. Este proyecto aborda dicha problemática, enfocándose en la estabilización de una aeronave para las tareas de despegue y aterrizaje en el plano vertical (PVTOL), al proponer un banco de pruebas que permita verificar las características y respuesta de controladores de movimiento para un vehículo PVTOL.

El sistema propuesto cuenta con dos grados de libertad y dos entradas de control, del cual se muestra el diseño del prototipo, así como el desarrollo del modelo matemático que representa el sistema. Adicionalmente se diseña esquema de control para la altitud y el ángulo de giro de un PVTOL utilizando un controlador no lineal, mismo que se verifica por medio de simulación en Matlab.

Palabras clave: PVTOL, No Lineal, Control, UAV

1. Introducción

El control de vehículos aéreos no tripulados (UAV) de despegue y aterrizaje planar vertical (Planar Vertical Take-Off and Landing PVTOL) ha sido estudiado extensamente por varios investigadores [1], [2], [3], [4], [5], [6] y [7] motivado por la necesidad de estabilizar algunas aeronaves como los helicópteros, cuadricópteros, etc., en los cuales el ángulo de alabeo para despegue y aterrizaje se mantenga en cero grados.

Adicionalmente en la Universidad Aeronáutica de Querétaro se ha comenzado a desarrollar habilidades y capacidades para la investigación en UAVs, enfocándose en la implementación de algoritmos de control. Debido a lo anterior se propone el diseño y fabricación de una plataforma que emule la respuesta de un vehículo PVTOL y permita la simulación de diversos esquemas de control.

Como parte del desarrollo del proyecto se ha seguido una metodología de diseño del prototipo que se requiere fabricar, haciendo uso de software especializado (SolidWorks) se modela la plataforma, y se proponen los materiales para su manufactura.

La aeronave en la que se enfoca el siguiente sistema tiene tres grados de libertad correspondientes al ángulo de alabeo, la altura y el desplazamiento longitudinal. El PVTOL está compuesto por dos motores separados que producen fuerza y momentos en la aeronave, que se moverá a través de un riel vertical, en la sección 3 se profundizará sobre los aspectos generales del diseño mecánico de la plataforma de pruebas, y se mostrará el diseño preliminar.

Para sentar las bases de la aplicación que se le dará al prototipo, se hace la propuesta del modelo del sistema, tomando en cuenta el diseño del prototipo y basándose en algunos trabajos expuesto en

artículos científicos [8] y [9]. Este modelo será un punto de partida para desarrollar una metodología en el diseño de los sistemas de control para el banco de pruebas propuesto.

Uno de los primeros trabajos en proponer un esquema de control automático es presentado en [6], donde se desarrolla una aproximación mediante un procedimiento de linealización entrada-salida. En [2] se propone una extensión del resultado propuesto por [6], a partir de un modelo matemático simplificado. Revisando la literatura científica al respecto del tema, se hace una propuesta para un controlador no lineal por modos deslizantes [8] misma que se presenta en la sección 3 de este artículo.

Finalmente se presentan los resultados parciales del proyecto, así como las conclusiones el trabajo futuro para implementar el banco de pruebas propuesto y comenzar a verificar los sistemas de control en UAVs con esquema PVTOL.

2. Modelo matemático

El vehículo PVTOL a controlar, está compuesto por dos motores independientes con propelas para producir empuje y un par de torsión en dirección del eje de rotación. Para lograr un desplazamiento vertical en el eje z, se deberá aumentar o disminuir la velocidad de rotación de los motores en la misma magnitud. Si se cambia la velocidad de giro de las propelas, se logrará una rotación en el eje de alabeo θ acompañado de un desplazamiento en el eje x.

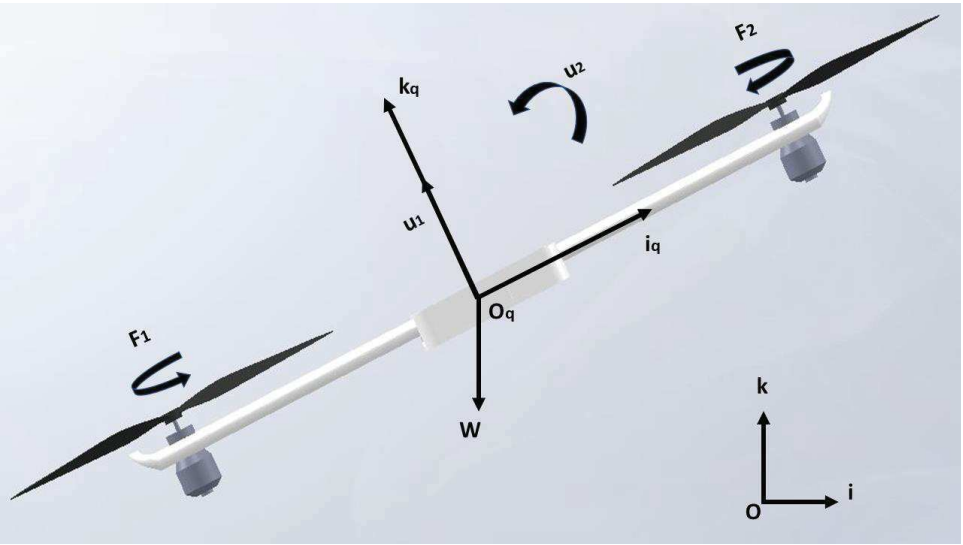


Figura 1. Diagrama de fuerzas del sistema PVTOL

En el esquema de la Figura 1 se pueden apreciar las fuerzas presentes en el sistema en función del marco de referencia fijo, para el análisis se considerará un marco de referencia móvil con una rotación θ con eje de rotación Oq.

El modelo matemático se desarrolla a partir del diagrama de fuerzas de la Figura 1 y mediante el formalismo Newton-Euler, el cual hace uso de la segunda ley de Newton con la suma de fuerzas en el marco de referencia móvil, en las coordenadas i_q y k_q

Las fuerzas presentes en el sistema son u_1 que es la fuerza de empuje total generada por las propelas la cual es normal a las alas, u_2 es el torque generado por el giro de las propelas alrededor del centro de masa en el punto Oq y el peso W aplicado sobre el eje **-k**

Con lo cual las ecuaciones de movimiento escritas en términos del centro de masa C sobre el marco de referencia fijo son:

$$\sum \mathrm{Fx} = \mathrm{m}\ddot{\mathrm{x}} \tag{1}$$

$$m\ddot{x} = -u_1 sen\,\theta + \epsilon u_2 cos\,\theta \tag{2}$$

Obtenidas a partir de la suma de fuerzas en el eje **i** perteneciente al marco de referencia fijo mediante la relación mostrada en la ecuación 3

$$\boldsymbol{k}_b sen\theta = -\boldsymbol{i} \tag{3}$$

Donde ϵ es un parámetro que caracteriza el acoplamiento entre el momento de balanceo y la aceleración lateral de la aeronave. La ecuación en el eje $\mathbf{z}$ obtenida por la suma de fuerzas y proyectadas en el eje **k**, mediante la relación

$$\boldsymbol{k}_b cos\theta = \boldsymbol{k} \tag{4}$$

Es:

$$\sum \mathrm{F\,z} = \mathrm{m}\ddot{\mathrm{z}} \tag{5}$$

$$m\ddot{z} = u_1 cos\,\theta + \epsilon u_2 sen\,\theta - mg \tag{6}$$

La ecuación restante se obtiene con la analogía de la segunda ley de Newton para torques, la cual sostiene que el torque neto sobre un objeto que tiene un punto de rotación fijo ocasiona una aceleración angular sobre él, la cual es inversamente proporcional a cierto momento inercial, lo que nos lleva a la ecuación

$$\sum \tau = J\ddot{\theta} \tag{7}$$

$$J\ddot{\theta} = u_2 \tag{8}$$

Las ecuaciones 2, 6 y 8 definen el modelo matemático del sistema PVTOL a analizar, pero en general el parámetro ϵ se considera nulo, obteniendo el modelo dinámico:

$$m\ddot{x} = -u_1 sen\,\theta \tag{9}$$

$$m\ddot{z} = u_1 cos\,\theta - mg \tag{10}$$

$$J\ddot{\theta} = u_2 \tag{11}$$

El cual se puede apreciar es un sistema que presenta tres grados de libertad y solo dos actuadores, por lo que se trata de un sistema subactuado. Debido a que el objetivo es un despegue y aterrizaje planar, el ángulo de giro se desea siempre sea cero, con dicha consideración la posición horizontal de la aeronave no se analizará en el presente trabajo.

La entrada de control u_2 que corresponde al momento torsional alrededor de Oq, se define por

$$u_2 = l(f_1 - f_2) \tag{12}$$

Donde l es la distancia respecto a los motores y el centro de gravedad.

La fuerza de empuje depende de igual forma de la fuerza generada por las propelas, defiendo la otra entrada de control como:

$$u_1 = f_1 + f_2 \tag{13}$$

Cada propela gira alrededor del eje z en el marco fijo al vehículo con una velocidad angular, con lo que la fuerza de empuje y el torque se expresan como una relación del cuadrado de la velocidad angular de cada propela, tal que:

$$f_i = \mathrm{d}\Omega_i^2 \tag{14}$$

Donde d es un parámetro constante conocido como factor de empuje y Ω_i es la velocidad angular de cada propela. Con lo que las entradas pueden ser redefinidas como:

$$u_1 = d(\Omega_1^2 + \Omega_2^2) \tag{15}$$

$$u_2 = ld(\Omega_1^2 - \Omega_2^2) \tag{16}$$

Haciendo $x_1 = x, x_2 = \dot{x}, z_1 = z,\ z_2 = \dot{z},\ \theta_1 = \theta$ y $\theta_2 = \dot{\theta}$ tenemos el sistema en variables de estados de la forma

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \mathrm{x}_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{m}u_1 \mathrm{sen} \\ \dot{z}_1 &= \mathrm{z}_2 \\ \dot{\mathrm{z}}_2 &= \frac{1}{m}u_1 \cos\theta - \mathrm{g} \\ \dot{\theta}_1 &= \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 &= \frac{1}{J}u_2 \end{aligned} \tag{17}$$

Del sistema resultante 17, aún es posible realizar cambios de variables, para simplificar el análisis, suponiendo

$$v_1 = u_1 cos\theta - g \tag{18}$$

Donde v_1 será la nueva entrada de control encargada de imponer la dinámica en lazo cerrado para la altura. Así, se tiene que

$$u_1 = \frac{v_1 + g}{cos\theta} \tag{19}$$

Sustituyendo la ecuación 19 en el sistema 17 se tendrá

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \mathrm{x}_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{m}(v_1 + g)tan\ \theta \\ \dot{z}_1 &= \mathrm{z}_2 \\ \dot{\mathrm{z}}_2 &= \frac{1}{m}v_1 \\ \dot{\theta}_1 &= \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 &= \frac{1}{J}u_2 \end{aligned} \tag{20}$$

Lo anterior permite que se desacoplen las variables asociadas a la altura y al ángulo de giro

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 39, pp.495 – 504, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

3. Diseño del prototipo

El sistema PVTOL fue diseñado para moverse con dos grados de libertad, el alabeo θ y el eje z, para lo cual se diseñaron las alas que soportarán los motores brushless que moverán las propelas y generarán las dos entradas de control del sistema que se observa en las ecuaciones mostradas anteriormente. El tercer grado de libertad presente en las ecuaciones no se aplicará en el sistema físico ya que se reducirá su movimiento al eje z, y el desplazamiento lateral inherente al sistema se restringe mecánicamente y la energía del movimiento se disipa al presentar fricción en las juntas del sistema.

Los soportes de las propelas o alas fueron diseñados con SolidWorks y se obtuvo el prototipo mediante impresión 3D en material PLA para realizar las modificaciones pertinentes y aligerar el peso de la aeronave así como darle cierta rigidez que no se logra con otros materiales, dicho diseño se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Diseño en CAD del prototipo de sistema PVTOL

Para lograr el movimiento de alabeo, el soporte de las alas contiene un mecanismo con rodamientos para permitir ambos grados de libertad, todo el sistema se une a un perfil Bosch para permitir el desplazamiento en el eje z como se observa en la Figura 3, el cual es el prototipo 3D final del sistema a implementar

Figura 3. Diseño final 3D del prototipo

Para producir la velocidad angular necesaria en las propelas para el movimiento en los ejes, se utilizan motores brushless los cuales necesitan dispositivos electrónicos de control sofisticados y fuentes de alimentación reguladas, para lograr dicho control se utilizaron dispositivos conocidos como ESC o variadores de velocidad los cuales generan la señal a las tres bobinas del motor para lograr la modificación de velocidad y de dirección a partir de una señal de entrada PWM de frecuencia de 50Hz y una variación de duty cycle entre 1 y 2ms.

Para el sensado del ángulo de alabeo y del eje z se utiliza un giroscopio digital GY50 L3G4200D el cual es un sensor de velocidad angular giroscópico de 3 ejes que genera datos que se envían por I2C a un microcontrolador. El sensor se fijará en la parte inferior de la estructura alar de la aeronave para obtener las mediciones necesarias para el control de ambos ejes.

Como se mencionó anteriormente es necesario generar señales PWM para ambos motores brushless, una comunicación I2C con el giroscopio y un filtrado de dichos datos para obtener ángulos libres de ruido; para hacer posible esto se utilizará un launchpad Hercules TMS570LS04 que cuenta con un microprocesador de dos núcleos ARM Cortex-R4 con algunas características como ADC de 12 bits, pines N2HET programables, SPI y otros protocolos de comunicación, características adecuadas para la aplicación requerida. La programación del microcontrolador se realizó con Code Composer.

4. Análisis del sistema

Una vez definido el modelo del sistema, se realizó su análisis, esto es, determinación de estabilidad absoluta y relativa, comportamiento en tiempo y frecuencia y respuesta a distintas variables de entrada; para posteriormente seleccionar las características de desempeño necesarias para asegurar el comportamiento deseado con el controlador.

Para poder obtener una simulación más aproximada al comportamiento real del sistema de la aeronave se generaron datos relevantes a partir del diseño en CAD y que aparecen en las ecuaciones dinámicas obtenidas. Los datos obtenidos son:

- J : Momento de inercia ($1.995\text{x}10^{-4} kg/m^2$).
- l: Distancia respecto a los motores y el centro de gravedad (25cm).
- m: Masa del vehículo (0.303kg).

Con lo cual las ecuaciones que modelan el comportamiento dinámico del sistema quedan como:

$$\begin{gathered} \dot{x}_1 = \mathrm{x}_2 \\ \dot{x}_2 = -3.3v_1 - 32.38tan\,\theta \\ \dot{z}_1 = \mathrm{z}_2 \\ \dot{\mathrm{z}}_2 = 3.3v_1 \\ \dot{\theta}_1 = \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 = 5012.53u_2 \end{gathered} \tag{21}$$

Dichas ecuaciones son no lineales por lo que se obtuvo su respuesta por aproximación numérica mediante el software Matlab con el complemento Simulink, el diagrama de bloques general, del subsistema y la respuesta a entradas escalón se observan en las figuras Figura **4**,Figura **5** yFigura **6**.

Al aplicar las entradas de control escalón, se esperaría que se alcance la posición en z y θ, en un tiempo finito, pero como se observa en la figura 6 el sistema sin control es inestable, no llega al valor de referencia en un tiempo dado. Lo anterior también se corroborar en el análisis dinámico obteniendo puntos de equilibrio, estabilidad absoluta y relativa donde se concluye que el sistema no es asintóticamente estable y por lo tanto necesitará de una ley de control que lo estabilice y alcance la posición y trayectoria deseada.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 39, pp.495 – 504, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

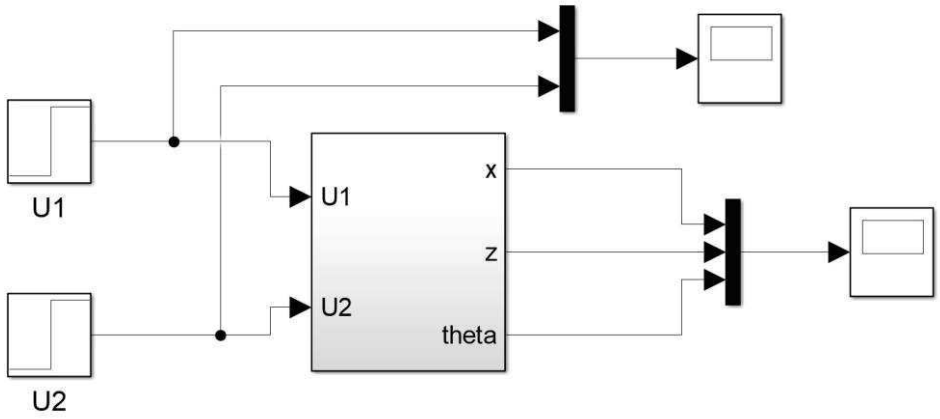


Figura 4. Diagrama de bloques sistema PVTOL

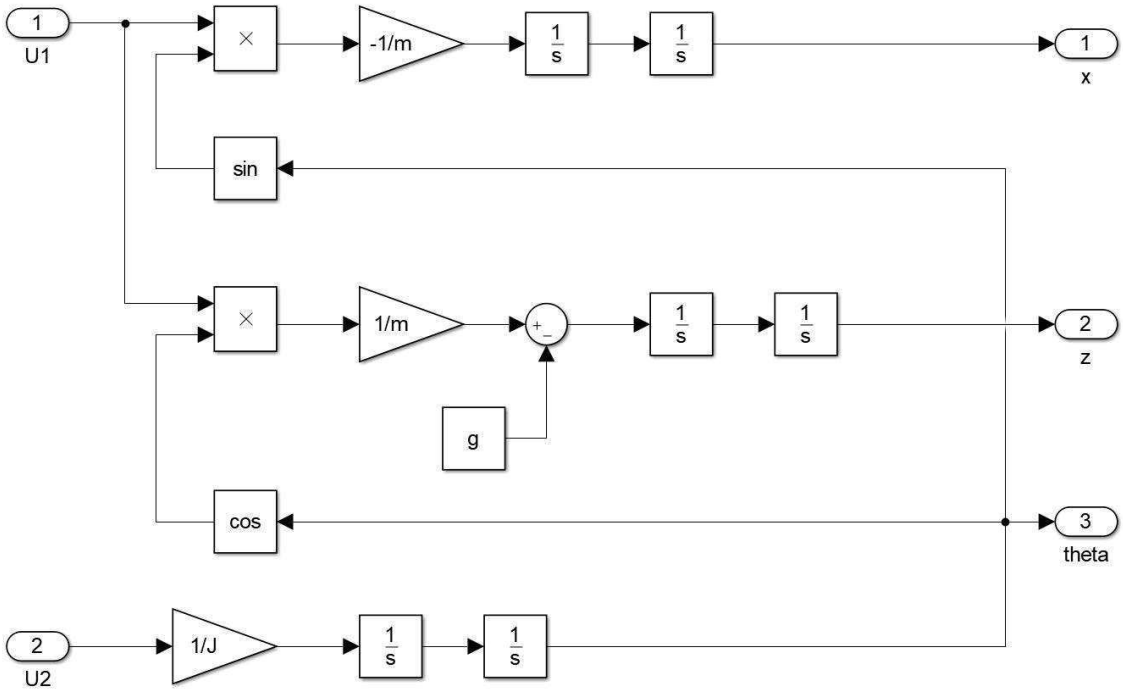


Figura 5. Subsistema para simulación de ecuaciones dinámicas

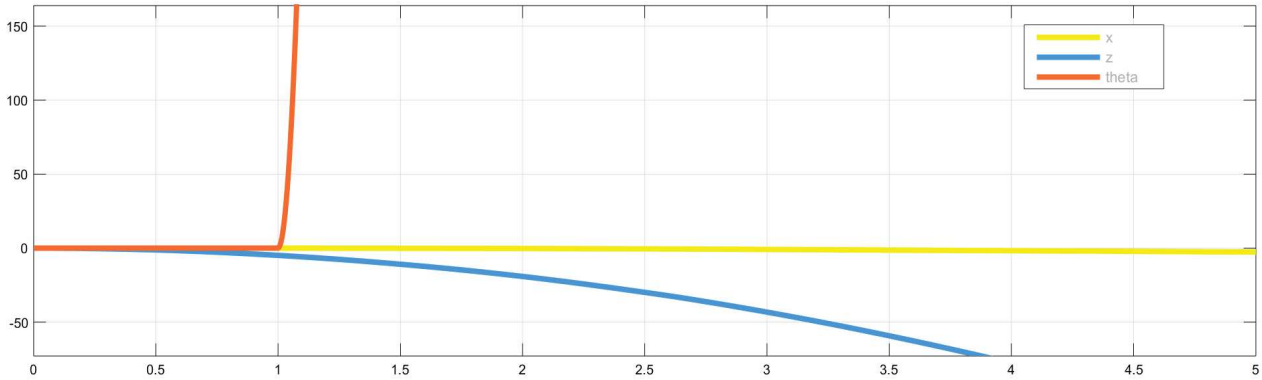


Figura 6. Respuesta en los tres ejes ante escalón unitario de las entradas u1 y u2

5. Controlador

Para alcanzar la dinámica deseada en la aeronave, es necesario implementar un controlador al sistema, para así lograr un ángulo de alabeo nulo y un despegue a altura deseada, el principal objetivo del sistema PVTOL. Para lograrlo se utilizará una ley de control propuesta por [2], en el cual se utiliza una ley de control no lineal mediante superficies deslizantes discontinuas.

La ley de control propuesta es:

$$v_1 = -b_1 v_z - \alpha_1 sign(\beta_1 sign(z - z_d) + v_z) \tag{22}$$

$$u_2 = -b_2 \omega - \alpha_2 \text{sign}(\beta_2 sign(\theta - \theta_d) + \omega) \tag{23}$$

Donde b_1, b_2, α_1, α_2, β_1 y β_2 son constantes reales positivas, sign es la función signo y (z_d, θ_d) es el espacio de solución deseado, como se mencionó anteriormente el tercer grado de libertad no se analizará para el presente trabajo.

El teorema presentado en [2], también establece las condiciones de las constantes de las leyes de control las cuales afirman que si se cumple que $b_1\beta_1 - \alpha_1 < 0$ y $b_2\beta_2 - \alpha_2 < 0$, entonces se garantiza que z tiende a z_d y θ tiende a θ_d cuando $t \to \infty$.

6. Resultados

En función de las ecuaciones dinámicas del sistema con los parámetros del prototipo fijo obtenidas mediante el diseño 3D mostradas en (21) y las leyes de control no lineal de (22) y (23) con los parámetros b_1=2, b_2=4, α_1=3, α_2=4, β_1=1 y β_2=1 simulado por 5 segundos y con las referencias deseadas z_d=1 y θ_d=0 se obtuvo el modelo en Simulink que se muestra en la Figura 7 y las salidas en los dos ejes que se puede observar en la Figura 8, con lo cual puede lograr apreciarse la diferencia entre el sistema ante una entrada sin control y el sistema controlado que aunque tenga un sobrepaso y un tiempo de asentamiento mayor a cero, alcanza la referencia de altura.

Los bloques de función de Matlab contienen las leyes de control v1 y u2 respectivamente a partir de las entradas de posición y velocidad en z, posición y velocidad angulares.

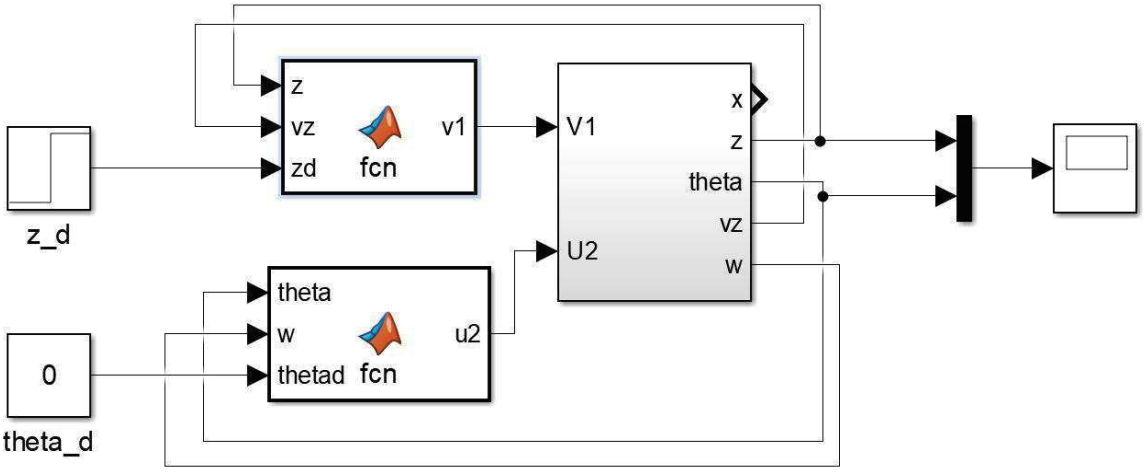


Figura 7. Diagrama de bloques del sistema PVTOL controlado

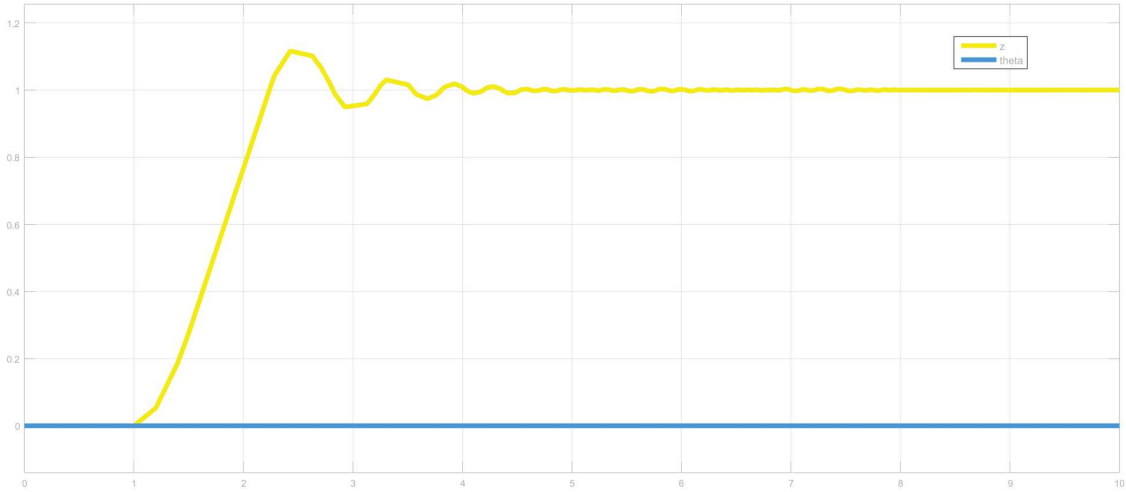


Figura 8. Respuesta en el eje z y el alabeo con el sistema controlado

7. Conclusiones

En el presente trabajo se obtuvo el modelado mediante el formalismo de Newton-Euler del sistema PVTOL para obtener las ecuaciones dinámicas que lo rigen, se obtuvieron ecuaciones de estado y se observó la no linealidad inherente, lo cual complica el control para alcanzar la posición deseada.

El sistema no lineal se simuló mediante Matlab omitiendo la linealización del sistema por lo que nos permitió tener una mejor aproximación al comportamiento real, el análisis de puntos de equilibrio y respuesta a distintas entradas es también una buena medida del comportamiento dinámico y que sirven para el diseño de la ley de control a utilizar. El modelado y cambios de variable del sistema es esencial para poder tener las variables de ángulo de alabeo y altura desacoplados y así cumplir con las características deseadas.

La ley de control mediante superficies deslizantes cumple con su función de regulación, al menos en la simulación realizada, con ligero sobrepaso y en un tiempo finito lo que garantiza que la aeronave tenga un despegue y aterrizaje con ángulo de alabeo 0, principal objetivo del sistema PVTOL.

El diseño en 3D presentado, la selección de actuadores e instrumentación son una buena aproximación a la posterior implementación física del sistema, lo que permitiría comprobar las simulaciones y obtener resultados validables.

Referencias

[1] Wang, X.; Liu, J.; Cai, K. Y. *"Tracking control for a velocity-sensorless VTOL aircraft with delayed outputs", Automatica*, 45, 12, 2876-2882, 2009.
[2] Hu, J. Zhang, H. *"Immersion and invariance-based command-filtered adaptive backstepping control of VTOL vehicles", Automatica*, 49, 7, 2160–2167, 2013.
[3] Abdessameud, A.; Tayebi, A. "*Global trajectory tracking control of VTOL-UAVs without linear velocity measurements", Automatica*, 46, 6, 1053-1059, 2010.
[4] Martin, P.; Devasia, S.; Paden, B. *"A different look at output tracking: control of a vtol aircraft", Automatica*, 32,1, 2160-2167, 1996.
[5] Sanchez, O.; Chimal, J.; Barron, R. *"Nonlinear Control Approach Applied to PVTOL with Restricted Cartesian Dynamic, Cybernetics and Physics*, 2, 3, 169-176, 2013.
[6] Hauser, J.; Sastry, S.; Meyer, G. *"Nonlinear control design for slightly non-minimum phase systems: Application to V/STOL aircraft", Automatica*, 28,4, 665-679, 1992.
[7] Zhang, W.; Brandt, R. "*Robust hovering control of a PVTOL aircraft", IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 7, 3, 343-351, 1999.
[8] Cuesta, R.; Alvarez, J.; Alvarez, E.; Miranda, M. "Control de altura de un vehículo aéreo planar con velocidad crucero" XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático, 373-378, Cancún, 2014.
[9] Ortiz, G.; Schacht, R.; Guerrero, M.; Reyes, J.; García, C. "Desarrollo y construcción de una plataforma experimental de un UAV para pruebas de control automático", Congreso Nacional de Control Automático 2017, 143-149, Monterrey, 2017.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 40, pp.505 – 517, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

Estudio para la Elección del Patrón de Muestreo para la Réplica de una Configuración Isobárica en la Atmósfera

Salas Ramírez Miguel Antonio
y Cházaro Zaharias Adriana

Universidad Aeronáutica en Querétaro.

Posgrado.
Colón, Querétaro, México.
miguel.a.salas.r@live.com.mx
adriana.chazaro@unaq.edu.mx

Resumen

En el presente proyecto se presenta la búsqueda y detección de corrientes convectivas mediante un algoritmo que reemplace o substituya el sentido de la vista humana y supone rastrear elementos en la atmósfera tales como la presión, temperatura o humedad a bordo de un aeromodelo equipado con sensores para sondear el ambiente y poderse guiar, en consecuencia, al encuentro de alguna termal. La forma de recoger o sondear tales elementos en la atmósfera para su posterior tratamiento y análisis, representa el primer paso importante en la solución del algoritmo, ¿existen condiciones ambientales más propicias?, ¿dónde debe comenzar el sondeo?, ¿qué patrón conviene seguir?, ¿cuál debe ser la frecuencia de muestreo?; son algunas de las interrogantes que deberán ser respondidas.

A partir de la comparación de representaciones gráficas de valores de presión en un collado o punto neutro en la atmósfera, ajustando el espaciado de los valores obtenidos y dependiendo del patrón de sondeo se logra discriminar la configuración (espaciado–patrón) que permite observar la mejor representación de los datos reales.; siendo este, el primer paso para orientar el camino hacia la búsqueda de corrientes convectivas (termales).

Palabras clave: Algoritmo, muestreo ambiental, sondeo atmosférico, patrón de muestreo, patrones isobáricos.

1. Introducción.

La atmosfera es la capa gaseosa que cubre la tierra; de composición homogénea en sus primeras capas y hasta los 80 Km., con un 78% nitrógeno, 21% oxígeno y 1% otros gases, [1] y es el medio en el que se desarrolla el vuelo de aeronaves tripuladas o no, mismas que llevan a cabo misiones de diferente índole.

Las aeronaves no tripuladas demandan de un sistema de guía y control que les permita evadir obstáculos, tales como la orografía o fenómenos meteorológicos adversos para la navegación aérea. Sin embargo, existen fenómenos meteorológicos que favorecen el vuelo de una aeronave, sobre todo, cuando se trata de extender su rango de operación extendiendo su autonomía logrando permanecer en el aire el mayor tiempo posible y por tanto, recorriendo mayores distancias, tal es el caso de las corrientes termales.

Las corrientes termales han sido explotadas desde los inicios de la aviación, representando fenómenos de relevante importancia para su estudio; aún en la actualidad. Adicionalmente, el uso

cada vez más profuso de aeronaves no tripuladas facilita la tarea de los científicos al tratar de estudiarlas, sin embargo, aún persiste la dificultad de precisar su ubicación por medios distintos a la visión.

Con el fin de dotar a una máquina de la capacidad de detectar y localizar termales, la presente investigación, busca emplear una alternativa, tanto al sentido de la vista humana como a instrumentos de visión artificial; para que, mediante la medición de elementos atmosféricos: como la temperatura, presión o humedad, sea capaz de rastrear termales, siendo imprescindible, realizar sondeos atmosféricos.

El presente proyecto, aborda las fases de: toma de información obtenida mediante sondeos atmosféricos, tratamiento de dicha y representación gráfica del estado de la atmósfera, las cuales serán la base para su posterior empleo en la búsqueda y detección de termales.

2. Desarrollo.

2.1 Marco teórico.

Nubes de tormenta.

Las tormentas asociadas a las corrientes termales, producto de la formación de nubes cúmulos[1], representan una importante fracción de la circulación atmosférica a mesoescala, por lo que resulta indispensable para la aviación examinar los aspectos termodinámicos y dinámicos de nubes cúmulos individuales. El estudio de la convección en nubes cúmulos es extremadamente complejo, dada su intrincada estructura interna, estas nubes generalmente están compuestas por numerosas corrientes individuales que propician el desarrollo vertical de las nubes y son de corta duración, estas a su vez, se deben al aire caliente ascendente llamadas “termales” (figura 1), arrastrando aire del medio ambiente y modificándolo mediante la mezcla interna dentro de la nube.

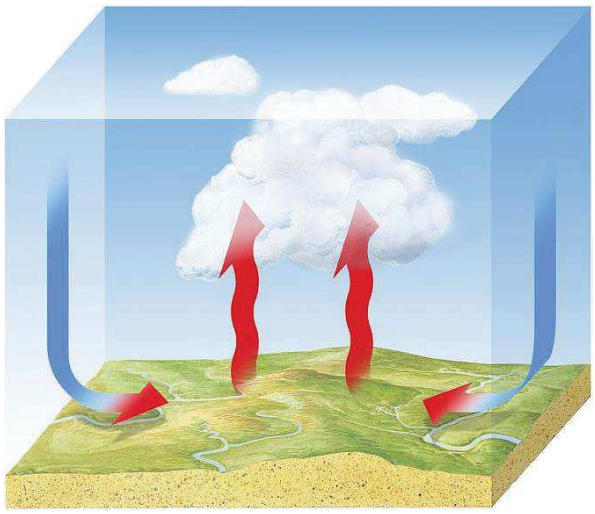


Figura. 1, Nubes cúmulos producto de corrientes termales.

Las termales no responden a un comportamiento hidrostático (diferencias de presión–densidad), son inestables y altamente turbulentas. Sin embargo, la fuerza ascensional de una termal

[1] Conjunto de minúsculas gotas de agua suspendidas en el aire, que se asemejan a un algodón compactado, en esta etapa de formación de una nube no suelen existir precipitaciones como lluvia o llovizna, sin embargo, si las condiciones atmosféricas con propicias, estas nubes suelen ser precursoras de extensas y grandes nubes tormentosas (llamadas cumulunimbus) en tan solo unas horas.

individual (es decir, la diferencia entre su densidad y la densidad del medio ambiente) depende de numerosos factores, entre los que destaca el gradiente de temperatura del medio ambiente y la densidad del aire húmedo, [2].

Las condiciones meteorológicas en las inmediaciones de una nube de tormenta, previo a su formación, proveen importante información de lo que será su desarrollo, madurez y posterior disipación, y más importante aún: sobre el carácter e intensidad de las precipitaciones en caso que se produzcan.

Por lo anterior, la primera parte del problema corresponde a la necesidad de obtener datos de la atmósfera en un amplio espacio en el menor tiempo posible, por lo que se propone el uso de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) de ala fija que realice patrones de vuelo previamente planeados y programados específicamente para tal fin. Adicionalmente, dicho vehículo podrá ajustar su trayectoria de vuelo buscando posicionarse en aquellos puntos del espacio que mejor convengan para obtener datos meteorológicos del estado y comportamiento de la atmósfera, inclusive podrá evitar áreas en las que las condiciones ambientales representen un riesgo para un vuelo seguro, que dificulten su tránsito o que impidan su retorno a salvo; esto, en respuesta a los indicios que evalúe en tiempo real acorde a sus propias capacidades de vuelo.

Humano vs máquina.

La vista de un piloto humano, es la principal herramienta en la detección de termales. Éstas son evidentes durante el día gracias a la presencia de insípidas nubes cúmulos que comienzan a aparecer a un mismo nivel y en forma aislada sobre el horizonte, (figura 2). Cada una de estas nubes cúmulos, inminentemente está asociada a una corriente termal que la alimenta de humedad, energía cinética, calorífica y momentum.

Figura. 2, Piloto humano en búsqueda de termales.

Sondeo atmosférico.

Anteriormente solo se tenían estudios cualitativos que se basaban en la observación sensorial de los patrones de vuelo de algunas aves; posteriormente, se usaron tablas de contingencia que relacionan el aspecto del cielo con mediciones en superficie, [4]. El primero de los estudios cuantitativos respecto al estudio de termales en la atmósfera fue llevado a cabo con mediciones mediante sondas transportadas por globos, [11].

Sondas títere (ascendentes y descendentes).

Las sondas ascendentes son dispositivos atados a un globo inflado con helio o hidrógeno (figura 3, izquierda), que son liberados a horarios regulares dos veces al día para recolectar datos del estado de la atmósfera, su seguimiento mediante señales electromagnéticas (ondas de radio), lo que facilita el cálculo de su posición que, al estar a merced del viento, se puede calcular la dirección e intensidad del mismo a diferentes niveles de altura.

Figura. 3, Sondas títere.

Por otra parte, las sondas descendentes, son dispositivos homólogos a los anteriores, solo que en este caso se atan a paracaídas que son soltados desde aeronaves (figura 3, derecha), llevando así un recorrido en sentido inverso, pero recabando la misma información.

El pronóstico meteorológico se sustenta en la información obtenida mediante observaciones en la superficie, de una extensa red de estaciones meteorológicas; a la vez que se obtienen datos en altura con las sondas títere, que pueden alcanzar varios kilómetros. Sin embargo, estas observaciones son menos frecuentes y numerosas, además de que su trayectoria está a merced de los vientos en la atmósfera.

Vehículos no tripulados para investigación atmosférica.

La historia de los UAV's en la investigación atmosférica se remonta a principios de los años 70's, [12] en aquel momento, los sistemas eran simples aeronaves modelo piloteadas remotamente y equipadas con primitivos sensores meteorológicos. Un ejemplo similar en días más modernos es el KALI UAV (figura 4), que fue desarrollado en la Universidad de Múnich, Alemania a finales de los años 90. Este sistema se ha utilizado con éxito en varias operaciones de campo para medir perfiles de temperatura y humedad relativa de hasta 3 km. sobre el suelo, [13][14]. La principal deficiencia de estos sistemas era su falta de capacidades autónomas, dado que necesitan la guía constante de un piloto experto y por lo tanto, son muy limitados con respecto a su autonomía y resistencia, así como al número de aeronaves que se pueden desplegar de manera simultánea [5].

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 40, pp.505 – 517, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

La velocidad y alcance de un UAV frente a cualquier otro tipo de vehículo de sondeo atmosférico (sondas títere por medio de globo o paracaídas, ala móvil, multi–rotor, etc.) representan su mayor ventaja, puesto que el tiempo recolección de datos se reduce evitando el “desfase temporal” de los datos obtenidos al principio, con respecto a los del final; logrando así, lo más cercano a una “instantánea” de las condiciones atmosféricas, [3].

Figura. 4, Aerosonda KALI.

Una aeronave tiene la capacidad de explorar un área extensa, puede dirigirse con facilidad hacia diferentes puntos o seguir patrones de acuerdo a las necesidades de estudio. Por lo que este vehículo usado para la investigación atmosférica (figura 5), puede ser programado para que cumpla una misión con precisión de manera autónoma llevando a la aeronave al límite de sus capacidades de vuelo con un amplio margen de seguridad. Para recabar información de las variables termodinámicas atmosféricas, como: temperatura, presión y humedad es necesario hacer un sondeo en el trayecto por dónde atraviesa la aeronave, ajustando continuamente su actitud.

Figura. 5, Sondeo atmosférico usando un UAV.

2.2 Metodología.

A continuación, se describirá la metodología seguida en el presente trabajo, que se puede describir con las siguientes etapas: Determinar el patrón que seguirá la aeronave para la recolección de los datos; en esa trayectoria, decidir cuál debe ser el espaciamiento de la toma de datos para la posterior recreación de la atmósfera por medio de interpolación y que al graficarlos reproduzcan de la manera más fiel la configuración isobárica.

Espaciado del muestreo, tasa de muestreo y velocidad de la aeronave.

De acuerdo a Hemingway et al., [7] para una escala vertical en la atmósfera, es conveniente muestrear la temperatura aproximadamente cada 3 m. y para la humedad relativa de 1.5 a 2 m., los cuales son suficientes para capturar la estructura espacial del ambiente. Por otra parte, Lenschow [8] empleó muestreos aproximadamente cada 5 m. para la temperatura y la humedad.

Producto del estudio del presente trabajo y de acuerdo al comportamiento de los gradientes verticales y horizontales de la presión atmosférica, y sus variaciones con el tiempo, se decidió tomar datos cada 50, 75, 100, 150, 200 y 250 m. Para el experimento posterior se usará un aeromodelo convencional que vuela a una velocidad de 15 a 25 m/s, por lo que se requerirán tazas de muestreo del orden de las 20 muestras por segundo.

Área de búsqueda.

En el caso de la extensión horizontal de búsqueda acorde a los estudios de Lenschow, [8] y lo expuesto por Allen, [10], considerando el espesor de la capa convectiva z_i el número de termales susceptibles de encontrarse en un área cuadrada de dimensiones $x \cdot y$, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$N = \frac{0.6 \cdot x \cdot y}{z_i \cdot r_2} \quad (1)$$

siendo r_2 el radio externo de la termal determinado por Lenschow, [8] como:

$$r_2 = max\left(10{,}0.102\left(\frac{z}{z_i}\right)^{\frac{1}{3}}\left(1 - 0.25\frac{z}{z_i}\right)\cdot z_i\right) \quad (2)$$

a una altura del 25% de z/z_i, dependiendo del espesor de la capa límite convectiva z_i, el área en la que se podrían encontrar dos termales puede obtenerse por medio del nomograma de la figura 6; donde se relaciona la distribución horizontal de las termales (eje x) con el espesor de la capa límite convectiva (eje y).

Por término medio, la capa límite atmosférica tiene un espesor de 1 Km., por lo que para efectos del presente trabajo y de acuerdo al nomograma antes descrito, se determina que el área de búsqueda deberá ser un cuadrado de alrededor de 450 m de lado, porción del espacio de la atmósfera en donde es posible encontrar al menos un par de corrientes termales.

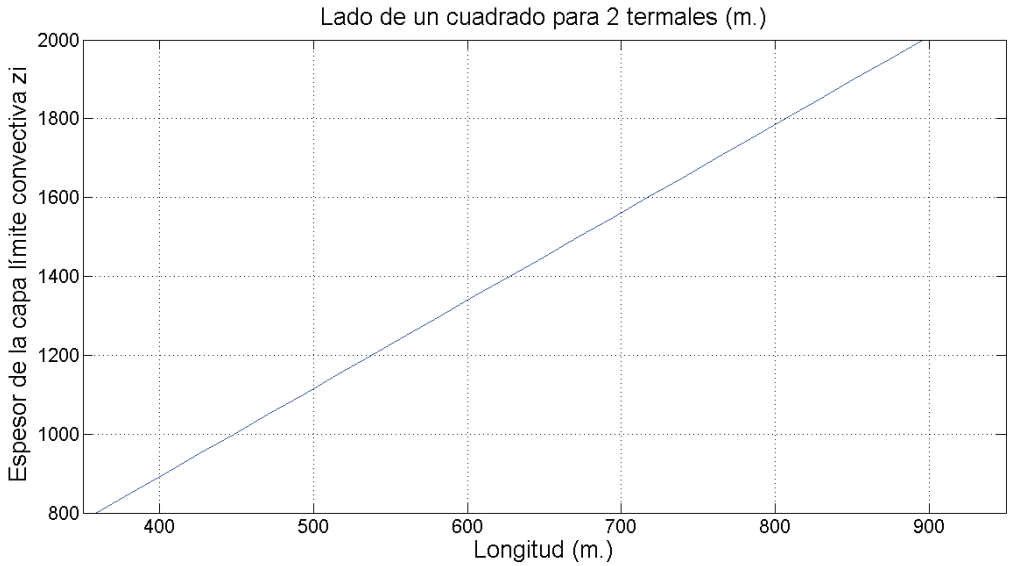


Figura 6, Nomograma para el área búsqueda.

Dado que, como se mencionó, se pretende sondear el espacio entre termales localizadas sensorialmente (sentido de la vista), observando las formaciones nubosas circundantes o mediante la ubicación de “islas de calor” como: poblados y complejos industriales, cuyos materiales de construcción proveen fuertes contrastes térmicos respecto al terreno circundante, dicha ubicación determinará el área sobre la cual deberá llevarse a cabo el patrón de vuelo, así como su orientación. En la figura 6 se muestra uno de los patrones de vuelo considerando el área mencionada e

Respecto al sondeo para obtención de datos, con el fin de cubrir la mayor área posible en el menor tiempo y recolectar la mayor cantidad de información, se consideraron diferentes patrones de vuelo en hélice, cruz, espiral y onda (figura 11), en el espacio de búsqueda. En la figura 7, se muestra un ejemplo de un patrón de muestreo considerando las dimensiones del área a sobrevolar.

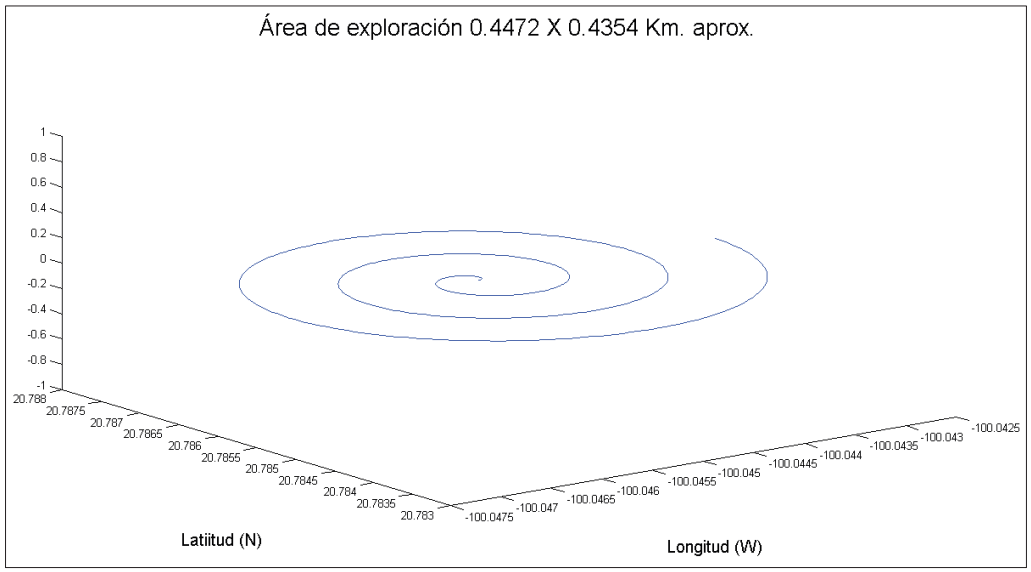


Figura 7, Ejemplo de patrón de vuelo.

Generación de datos de prueba para simulaciones.

Empleando algunas funciones de la "Aerospace Toolbox" de Matlab®, mismas que se basan en la atmósfera estándar internacional (ISA[2]), se generaron datos de control de una configuración de presión en la atmósfera conocida como collado o punto neutro (figura 8), es decir: el comportamiento de la presión en el espacio comprendido entre dos altas y dos bajas presiones.

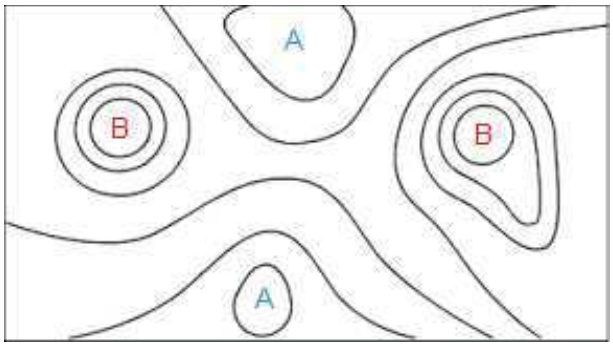


Figura. 8, Collado o punto neutro (A: altas presiones, B: bajas presiones).

En un collado, una superficie de presión isobárica (presión constante), es semejante a un paraboloide hiperbólico, de tal manera que su función matemática correspondiente permitirá distribuir valores de presión en forma vertical, ajustándose a un gradiente vertical de presión a partir de la función `atmospalt()` de Matlab®., la cual calcula la altitud en función de la presión del ambiente.

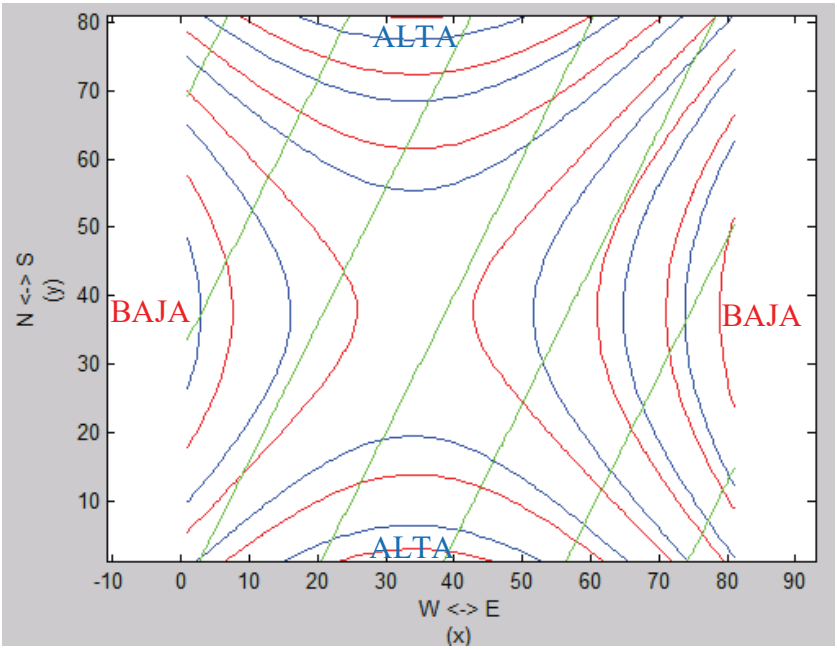


Figura. 9, Collado o punto neutro con funciones de Matlab®.

En el caso de obtener dos superficies isobáricas a dos diferentes niveles (azul: nivel inferior, rojo: nivel superior), es posible hacer una resta de la altura geopotencial a la cual se obtuvieron tales valores (en verde), generando así una gráfica conocida en meteorología como "espesor" (figura 9).

[2] International Standar Atmosphere, *U.S. Standard Atmosphere*, 1976, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

Comparación de patrones de sondeo

Los datos de control generados mediante las funciones de Matlab®, fueron procesados mediante un algoritmo para la reconstrucción gráfica de una superficie isobárica con la posibilidad de variar la separación entre cada dato (figura 10), previo al proceso de interpolación bidimensional, ajustando los datos la rejilla.

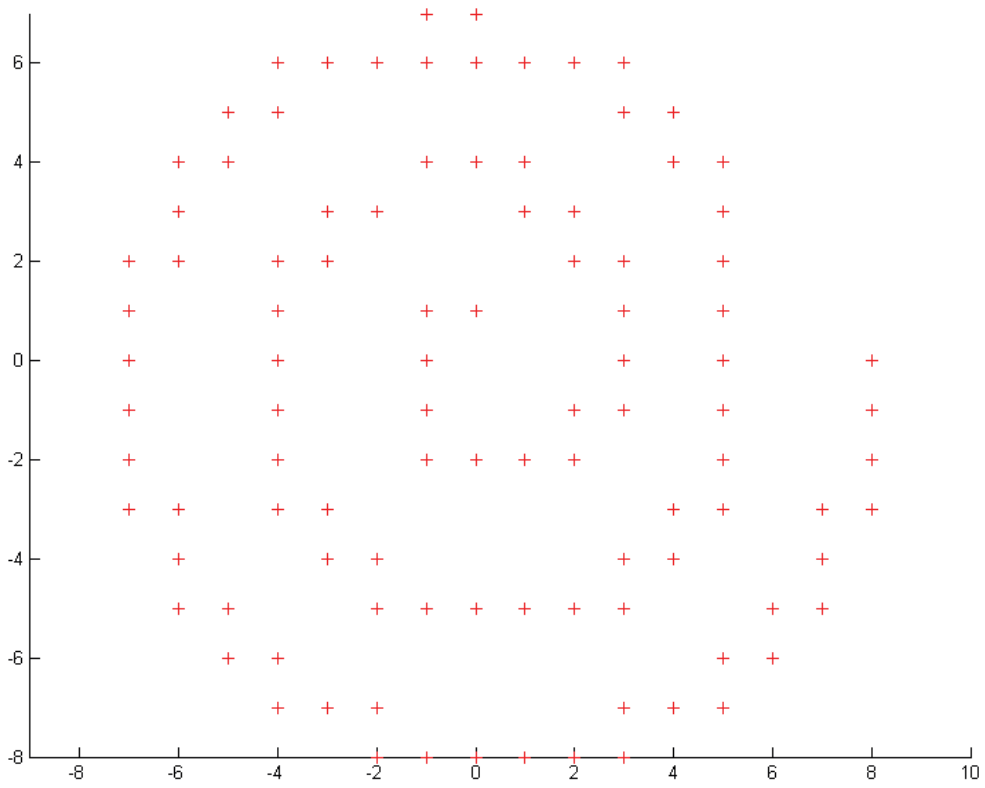


Figura 10, Datos seleccionados y ajustados a cuadrícula.

La implementación del algoritmo requirió de una función para discretizar los datos distribuyéndolos en una rejilla con intervalos de distancia desde 50 hasta 250 metros. A medida que se desarrolla el sondeo, el algoritmo debió tener la capacidad de detectar en qué momento, la sonda ocupó una nueva posición en la rejilla y en qué dirección, agregando una nueva fila, columna o ambas. Así mismo, a medida que esta rejilla va creciendo, se fueron realizando interpolaciones bidimensionales con los datos disponibles

Adicionalmente se hizo la comparación de diferentes patrones de sondeo con el objetivo de cubrir un área de muestreo representativa de tal modo que la toma de datos fuera capaz de mostrar los fenómenos que se pretende analizar. Por tanto, se eligieron trayectorias en forma de hélice, cruz, espiral y onda, como se muestran en la figura 11; cada patrón fue analizado a una distancia de separación de datos de: 50, 75, 100, 150, 200 y 250 metros. Finalmente se mostraron los resultados mediante gráficas de contornos.

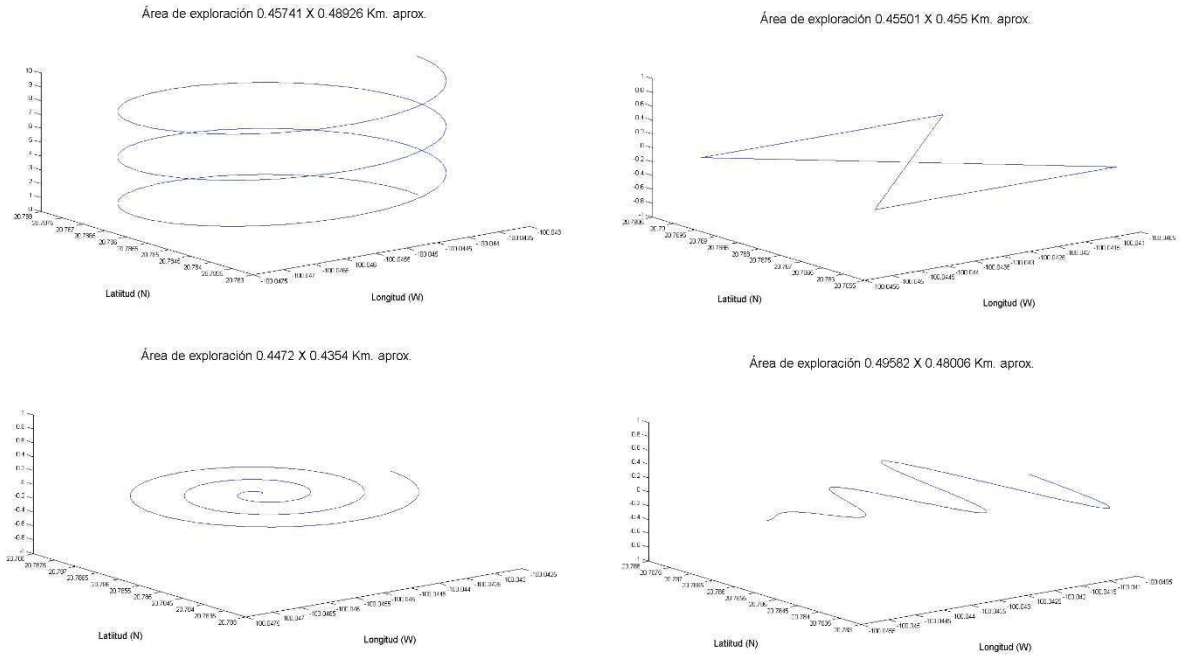


Figura 11, Patrones de sondeo.

Análisis de resultados

Se espera que las simulaciones repliquen de la manera más fiel la configuración isobárica propuesta, tomando los datos a intervalos “convenientes”, y tratándolos mediante interpolaciones para “cubrir” aquellos puntos por dónde la aeronave no transitó, debido al patrón de vuelo mediante el cual se hayan recolectado. De esta forma y mediante comparaciones de las gráficas de las configuraciones isobáricas obtenidas se determinará el mejor patrón de vuelo, así como la tasa de muestreo de datos; esta última estará relacionada con el espaciado de muestreo y velocidad de la aeronave que deberán definirse para experimentos en campo.

3. Resultados.

Empleando cada uno de los patrones de vuelo y variando en cada uno las distintas separaciones de los datos tomados en cuenta para generar gráficas de contornos, se observa que a un espaciado cerrado de los datos (50 m.), todos los patrones, tienden a mostrar numerosos contornos cerrados (que no existen en un collado), incluso los patrones de cruz y hélice, tienden a mostrar configuraciones muy semejantes es dichas trayectorias; en el otro extremo (espaciado de 250 m.), sólo los patrones de onda y cruz, mantuvieron como resultado contornos cerrados.

En general, todos los patrones mostraron contornos cada vez más abiertos conforme aumenta la separación de los datos seleccionados para graficar, tendencia que se desarrolla con mayor rapidez con el patrón en espiral desde medianas separaciones (100 o 150 m.).

Dando como resultado, que el conjunto de datos que mejor represente la configuración de presión atmosférica propuesta (collado), es aquel que se obtuvo mediante un patrón de sondeo **espiral** y eligiendo los datos a una distancia entre **150 y 200 m.** (figura 12).

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 40, pp.505 – 517, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.

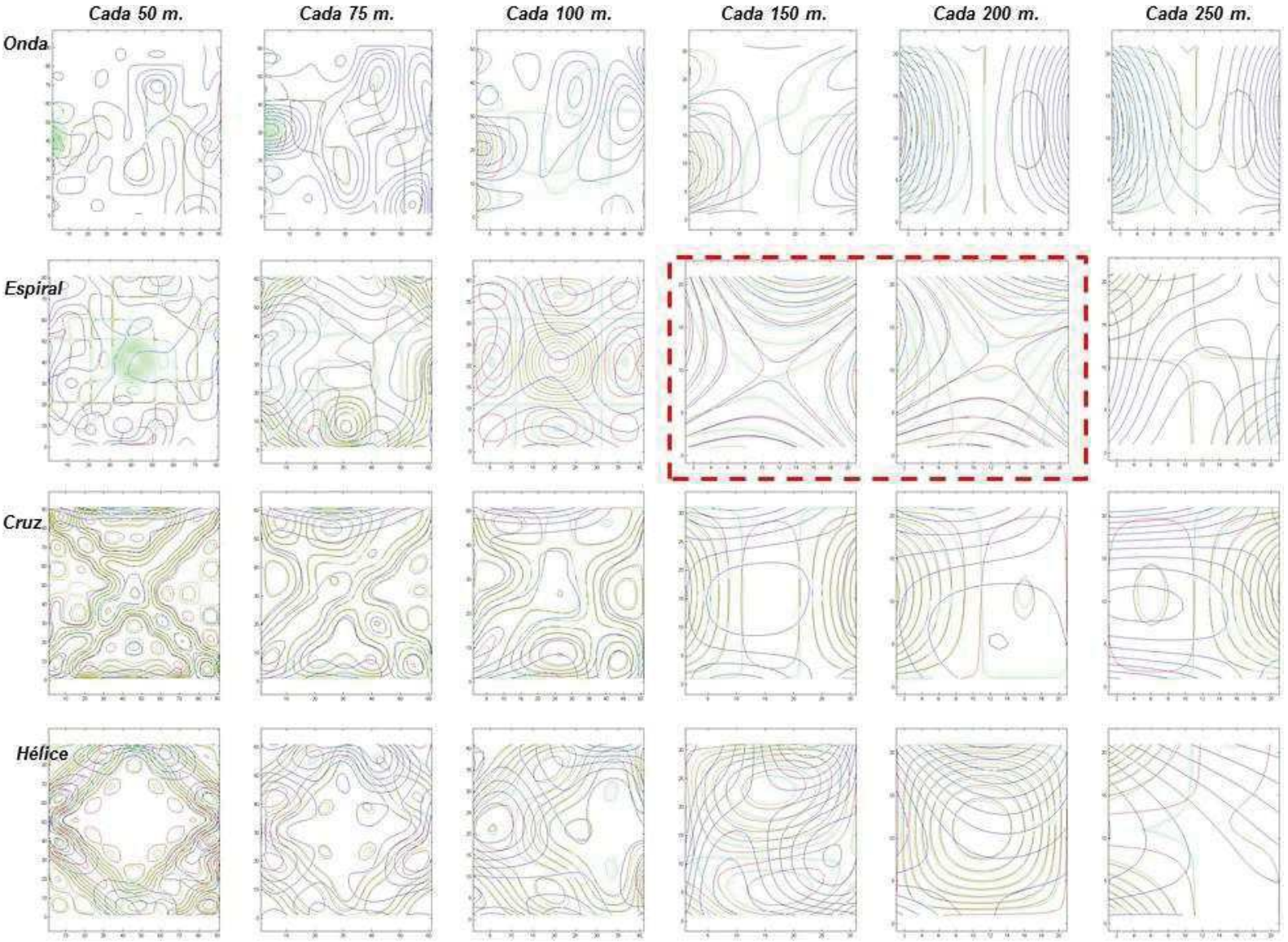


Figura 12, Comparación del efecto espaciado en la toma de datos entre diferentes patrones de sondeo.

4. Conclusiones.

El algoritmo es altamente sensible al patrón empleado durante el sondeo, favoreciéndole una trayectoria en espiral para lograr cubrir el mayor espacio posible y minimizar la falta de datos en grandes espacios, previo a la interpolación bidimensional de los mismos.

La separación de los datos también es importante, considerándose un valor medio de 175 m. de separación entre ellos, lo cual es consistente con los gradientes horizontales de presión, que son débiles es esta dirección.

En cuanto la altura propicia para el sondeo, esta puede considerarse con un valor medio de 250 m., es decir a un 25% de la altura de la capa límite atmosférica que se considera por término medio de 1 Km.

A partir de la certera representación del estado de la atmósfera en esta primera etapa, será posible realizar análisis meteorológicos como el de “espesores”, los cuales permiten detectar flujos advectivos de aire cálidos o fríos para una ubicación precisa de termales, tormentas, frentes, etc.

El sondeo atmosférico empleando aeromodelos (ala fija), al ser un recurso reutilizable permite abatir costos frente a las sondas desechables que se pierden después cumplir su cometido, además de abrir la posibilidad de otro tipo aplicaciones con mínimas adecuaciones.

Puesto que no se requiere de instalaciones especiales para su puesta en marcha y dada su portabilidad, es posible estudiar la atmósfera desde casi cualquier punto en superficie.

Referencias.

[1] Organización Meteorológica Mundial, "*Compendio de apuntes para la formación del personal meteorológico de la clase IV",* Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 1973.

[2] Holton J, "*An introduction dymanic metrology*", Elsevier Academic Press, USA, cuarta edición, 2004.

[3] Chen H, Wang G, Pan Y y Ma S, "*A miniature robotic plane meteorological sounding system", Advances In Atmospheric Sciences,* volumen 21, número 6, páginas 2, 2004.

[4] Jonassen, Marius Opsanger, *"Master's thesis in meteorology"*. 2008.

[5] Jonassen, Marius Opsanger, *"The Small Unmanned Meteorological Observer (SUMO), Characterization and test of a new measurement system for atmospheric boundary layer research"*, University of Bergen Geophysical Institute, Bergen, Noruega, 2008.

[6] Avery, Alyssa, "*CLOUD MAP: Atmospheric Sampling with UAS",* Oklahoma State Universtiy, United States of America, 2016.

[7] Hemingway B, Frazier A, Elbing B Jacob J, *"Vertical sampling scales for atmospheric boundary layer measurements from small unmanned aircraft systems (sUAS)"*, Oklahoma State University, Atmosphere MDPI, 2017.

[8] Lenschow D, Stephens P, *"The role of thermals in the convective boundary layer"*, U.S.A, 1980.

[9] American meteorological society, *"Meteorology glossary"*, American meteorological society, [En línea] [Citado el: 20 de 08 de 2018.] http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page.

[10] Allen M, "*Updraft model for development of autonomous soaring uninhabited air vehicles* ", Dryden Flight Research Center NASA, USA, 2005.

[11] Woodcock, A. H., *"Convection and soaring over the open sea"*, Journal of Marine Research, 3, pags. 248-253, 1940.

[12] Konrad T. G., *"The Dynamics of the Convective Process in Clear Air as Seen by Radar"*, Journal of Atmosphere Science, 27, Nov. 1970, pags. 1138- 1147.

[13] J. Egger and et al, *"Diurnal winds in the Himalayan Kali Gandaki valley"*; Part III: Remotely piloted aircraft soundings, Monthly Weather Review, 130 2042, 2002.

[14] J. Egger and et al, *"Diurnal circulation of the Bolivian Altiplano"*; Part I: Observations Monthly Weather Review, 133 911, 2005

Sinergia Mecatrónica

Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
Prolongación Corregidora Norte No. 168, interior E
Col. El Cerrito, C.P. 76160, Querétaro, Qro.
Se tiraron 1000 ejemplares, en formato digital pdf,
tipo internet, pp. 517, Tamaño: 45 Mb.

ISBN: 978-607-9394-17-2

SINERGIA MECATRÓNICA

ISBN: 978-607-9394-17-2

9 786079 394172

"MEDIANTE EL CONOCIMIENTO SEMBRAMOS EL FUTURO"

ASOCIACIÓN MEXICANA DE MECATRÓNICA A.C.