

# INNOVACIONES EN MECATRÓNICA

Juan Manuel Ramos Arreguín  
José Emilio Vargas Soto  
Carlos Alberto Ramos Arreguín



# **Innovaciones en Mecatrónica**

1ª Edición

**Juan Manuel Ramos Arreguín**  
**José Emilio Vargas Soto**  
**Carlos Alberto Ramos Arreguín**

**“Innovaciones en Mecatrónica”**

Juan Manuel Ramos Arreguín  
José Emilio Vargas Soto  
Carlos Alberto Ramos Arreguín

© Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.  
Fonología 116, Colonia Tecnológico  
C.P. 76158 Querétaro, Querétaro.  
México.

Internet: <http://www.mecamex.net>

1ª Edición, Octubre del 2017

**ISBN 978-607-9394-11-0**

**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 el libro son exclusivas de los autores de cada capítulo y no representan la postura de la Asociación Mexicana Mecatrónica A.C. Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización por escrito del propietario de los derechos del copyright.

Impreso en México – Printed in Mexico



## Índice

Capítulo 1	
Diseño de un atrapaniebla utilizando la tecnología para optimizar la captación de agua de neblina.....	1
Hernández García Edgar, Guerra León Elpidio, Guerra Hernández Selma Flor, Narciso Huerta Mauricio, Parra Cantero Horalia	
Capítulo 2	
Métodos de Automatización en PLC para Procesos Secuenciales .....	11
Méndez Guzmán Hugo Antonio, Jaramillo Chávez Esmeralda Lucero, Paz Vega José Giovanni, Rivera Quezada Carlos Arturo	
Capítulo 3	
Enfoque de control adaptable basado en optimización meta-heurística para un motor de CD .....	29
Rodríguez-Molina Alejandro, Villarreal-Cervantes Miguel Gabriel, Aldape-Pérez Mario	
Capítulo 4	
Algoritmo para obtención de Índice de desempeño, en configuraciones de robots SCARA, Cartesiano y Antropomórfico .....	41
Cortes Berruecos Rene, Torres Méndez Sergio Javier, Muñoz Hernández German Ardul, Reyes Cortes Fernando	
Capítulo 5	
Diseño de un Controlador PID Usando Memristores.....	57
Ortiz López Judith Azucena, Sánchez López Carlos, Gutiérrez Fonseca Silvia Patricia, Rivera Medinilla Francisco Javier	
Capítulo 6	
Análisis dinámico y estático de un robot móvil sometido a una fuerza externa de repulsión .....	67
Orozco Magdalena Ernesto Christian, Castillo Castañeda Eduardo, Mecalco Gutiérrez María Erika, Chaparro Rico Betsy Dayana Marcela, Jiménez Díaz Gilberto	
Capítulo 7	
Sistema de Grabado Láser .....	81
Macías González Israel, Almendárez Rodríguez Juan, OrtizAguilera Omar Fernando, Núñez Olvera OscarFernando, Pedroza Rodríguez Griselda	
Capítulo 8	
Sistema Anticolisión para el control de un vehículo aéreo no tripulado UAV .....	93
Ulises Pineda, Xóchitl Siordia, Dulce Cao Romero, Crescencio San Martín, Luis Ramírez	
Capítulo 9	
Prototipo de un Sistema de Navegación por Locomoción para Ambientes Virtuales .....	107
Hernández Mateo Edrein, Sepúlveda Cervantes Gabriel	



Capítulo 10	
Diseño y construcción de un Robot Gallito.....	119
Mario Duran-Plaza, Jorge Gudiño-Lau, Pedro Gómez-Estrada, Janeth Alcalá-Rodríguez, Saida Charre-Ibarra, Adrian Chávez-Ibarra	
Capítulo 11	
Sistema de monitoreo en arquitectura abierta para una mano con tres dedos articulados.....	133
Alcalá Rodríguez Janeth Aurelia, Gudiño Lau Jorge, Charre Ibarra Saida Miriam, Hernández Barón Eduardo	
Capítulo 12	
Sistema de Monitoreo de un Estacionamiento Bajo el Concepto de Internet de las Cosas.....	147
Polo Lara José Alberto, Ríos Rodríguez Marcelo, Salazar Vázquez Rosa Guadalupe, Méndez Alonso José Miguel, Ramiro Ramiro José	
Capítulo 13	
Implementación de un sistema biométrico para el encendido de vehículos por medio de la huella dactilar.....	157
Arvizu Ramírez Antonio, Chavero Reséndiz José María, Rodríguez Hernández Vicente, Suárez Enríquez José de Jesús, Vélez Castañeda Andrew	
Capítulo 14	
Simulación de un modelo dinámico para evaluar el crecimiento de la tilapia nilótica ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) .....	169
López Hernández Tomas, Martínez Hernández Ignacio, Mancilla Morales José Arturo, Ortega Cosme Gregorio	
Capítulo 15	
Interferómetro de fibra óptica aplicado para controlar la posición de un sistema péndulo-hélice.....	181
Francisco Gutierrez Zainos, Itzamary Romero Sosa, Alfonso Osorio Ignacio, Mauro Sánchez Sánchez, Julían Javier Carmona Rodríguez	
Capítulo 16	
Implementación y control de un robot autobalanceado .....	191
Guerrero Hernández Jesús Emmanuel, Charre Ibarra Saida Miriam, Murgan Ibáñez Jorge, Gudiño Lau Jorge, Janeth Aurelia Alcalá Rodríguez	
Capítulo 17	
Diseño de un sistema para un rehabilitador de hombro .....	205
Francisco Javier Espinosa-García, Mario Heladio . Lagunez-Caramon, Esther Lugo-González, Ricardo Tapia-Herrera, Manuel Arias-Montiel	
Capítulo 18	
Aplicación de Algoritmos Genéticos en la Planeación de Trayectorias de un Robot Manipulador Marca Mitsubishi RV-2AJ .....	219
Ambrocio Delgado Rocío, Lugo González Esther, Petrilli Barceló Alberto Elías	



Capítulo 19	
Simulación y evaluación de un modelo de crecimiento del cultivo de pepino (Cucumis sativus L.).....	231
Mancilla Morales José Arturo, Bravo Hernández Faustino	
Capítulo 20	
Viscosímetro Rotacional de Control Digital .....	243
Pérez Chimal Rosa Janette, Cabrera Esteves Juan Ricardo, Luna Puente Rafael, Hernández Mosqueda Carlos, Prieto Figueroa Araceli	
Capítulo 21	
Red Can Bus para la Sincronización de un Módulo de Inyección y Encendido de Combustible de un Motor de Combustión Interna .....	253
De Rosas Sandoval Esteban, Goches Sánchez Alfonso	
Capítulo 22	
Análisis de Trayectoria de Flexoextensión para el Dedo Índice Basado en Procesamiento de Imágenes para un Mecanismo Rehabilitador .....	265
Rodríguez León Jhon Freddy, Aguilar Pereyra José Felipe, Castillo Castañeda Eduardo	
Capítulo 23	
Plataforma electrónica para el acceso a edificios y/o casas mediante código QR encriptado .....	277
Troncoso-Ramos Jonathan Armando, Rodríguez-Reséndiz Juvenal, Pedraza-Ortega Jesús Carlos, Ramos-Arreguín Juan Manuel	
Capítulo 24	
Sistema embebido de detección de obstáculos con freeRTOS para un robot móvil.....	289
Ocampo Álvarez Arturo, Moreno Espinoza Oscar G., Fernández de Vega Francisco, Olague Caballero Gustavo	
Capítulo 25	
Sistema de autoalineación de un láser a fibra óptica de vidrio.....	301
Shomar Ríos Martín, Talavera Velázquez Dimas, Rivas Araiza Edgar Alejandro, De la Peña Trejo Javier	
Capítulo 26	
Sistema de control de movimiento para servomotores de AC basado en Microcontrolador y LM628 .....	315
Moreno Martínez Guillermo, Pedraza Ortega Jesús Carlos, Toledano Ayala Manuel, Rivas Araiza Edgar Alejandro	
Capítulo 27	
Manual de prácticas de laboratorio para la enseñanza de diseño mecatrónico .....	327
Díaz Hernández Octavio, Bernal Díaz Arcelia, Souza Jiménez José Antonio, Martínez Zamudio Patricio	



Capítulo 28	
Sonar programado en una Raspberry Pi para emplear en navegación de robots móviles .....	339
Mendoza-Hernandez Maria del Rayo, Perez-Carrizal Miguel Alfonso, Malagon-Soldara Salvador Manuel	
Capítulo 29	
Análisis de objetos para el proceso de digitalización en técnicas perfilométricas ...	353
Moya Morales Juan Carlos, Ramos Arreguin Carlos Alberto, López Torres Claudia, Pedraza Ortega Jesús Carlos	
Capítulo 30	
Desarrollo de un Microscopio de Contraste en Polarización de Campo Cercano en Modo Colección .....	365
Almendárez Rodríguez Juan, Lastras Martínez Luis Felipe	
Capítulo 31	
Desarrollo de un sistema computacional para robot paralelo utilizando simulación cooperativa .....	399
Jiménez López Eusebio, Fierro Ruiz Kevin, López Martínez Aldo Augusto, Rivera Nieblas Jorge Oswaldo, Delfín Vázquez Juan José	
Capítulo 32	
Diseño de un controlador PID para la inmersión y emersión de un vehículo submarino tipo Glider .....	409
Reyes Montiel Christian Gerardo, Ramos Fernández Julio Cesar, Campos Mercado Eduardo, Márquez Vera Marco Antonio, Trejo Macotela Francisco Rafael	
Capítulo 33	
GUI para adquisición y calibración de imágenes en procesos de reconstrucción de 3D de objetos .....	423
Ramos Arreguín Carlos Alberto, Moya Morales Juan Carlos, López Torres Claudia, Ramos Arreguín Juan Manuel, Pedraza Ortega Juan Carlos	
Capítulo 34	
Efecto de la variación del parámetro de escala en la WTP 2D y su efecto en la Reconstrucción 3D de objetos. ....	435
López Torres Claudia Victoria, Moya Morales Juan Carlos, Ramos Arreguín Carlos Alberto, Pedraza Ortega Jesús Carlos, Aceves Fernández Marco Antonio	
Capítulo 35	
Sistema mecatrónico de perforación de placas de circuito impreso .....	445
Torrijos Pérez Lizandro, Ramos Arreguin Juan Manuel, Dimas Talavera-Velázquez, Juvenal Rodríguez Reséndiz, Jesús-Carlos Pedraza-Ortega	
Capítulo 36	
Implementación de un sistema de dehazing basado en el canal oscuro en Raspberry pi 3 .....	459
Salazar-Colores Sebastián, Ramos Arreguin Juan Manuel, Garduño-Aparicio Mariano, Torres-Hernández Carlos-Miguel, Marco Antonio Aceves Fernández	



Capítulo 37

Modelado matemático de un cohete hidropulsado ..... 469  
Fuente Castillo Misael, Mancilla Alonso Humberto

Capítulo 38

Robótica Educativa para la Comprensión y aplicación de la Ley de Ohm ..... 477  
Campo Rincón Jaime Ernesto, Gutierrez Rios Ronald Saul



# Diseño de un atrapaniebla utilizando la tecnología para optimizar la captación de agua de neblina

Hernández García Edgar, Guerra León Elpidio, Guerra Hernández Selma Flor,  
Narciso Huerta Mauricio, Parra Cantero Horalia.

Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla  
Carretera Acuaco-Zacapoaxtla km 8 Col. Totoltepec, Zacapoaxtla, Pue.  
Tel. y Fax 01 (233) 31 75000  
www.itsz.edu.mx  
tecnologico@itsz.edu.mx

## Resumen

*El atrapaniebla es un sistema que difícilmente llegará alterar los ecosistemas, es conocida también como "agua nueva" debido que a que no viene de otro sistema hidrológico (río o acuífero) si no de la masa nubosa que viene del golfo de México a las altitudes de la Sierra Nororiental. Este proyecto se enfoca en innovar el atrapaniebla tradicional, implementado la tecnología para la captación de agua, y análisis de la misma, así como el del medio ambiente. La automatización del atrapaniebla, y monitoreo de las condiciones ambientales, permitirá un mayor aprovechamiento de la humedad y los diversos factores que influyen en la captación de agua. Al realizar el estudio de la humedad relativa de un lugar determinado, permitirá corroborar si el proyecto será viable en el entorno geográfico previamente analizado.*

**Palabras clave:** Atrapaniebla, tecnología, humedad, medio ambiente.

## 1. Introducción

En la actualidad existen problemas de abastecimiento de agua para las ciudades y pueblos rurales, puesto que no cubren en su totalidad las necesidades básicas en el hogar. Se presenta este problema por el efecto de las sequías en lagos y nacimientos. A partir de un acontecimiento impactante de escasez de agua, así como la sequía de Chile en 1956, donde el científico Carlos Espinoza implemento la idea del atrapaniebla, en donde la neblina, que son gotas de agua del tamaño microscópico con carencia de peso quedan suspendidas en el ambiente, son desplazadas por el aire. Al igual que los árboles y otros objetos que captan esta agua, el atrapaniebla fue diseñado con el propósito de captar agua a través de una malla.

Existen diversas formas de aprovechar el agua, por ejemplo: para consumo humano, en actividades agrícolas y consumo doméstico. Las fuentes de obtención de agua son varias, tal como: subterráneas, agua superficial de los lagos, ríos y agua de lluvia. La niebla, es un recurso que pocos han tomado en cuenta como un beneficio del potencial de este. Sin embargo, como alternativa de aprovechamiento y solución a problemas de abastecimiento en el suministro de este recurso, sería una alternativa más para dejar nuestra huella ecológica y dar una oportunidad a futuras generaciones de disfrutar nuestro bello ecosistema.

## 2. Planteamiento del problema

Debido a la escasez de agua y la contaminación de los sistemas hidrológicos en zonas agrícolas, donde se lleva a cabo la producción de vegetales o frutos, la toma de agua para los riegos es potable, dejando a los pobladores del lugar sin agua durante horas, días o incluso semanas.

Gracias a que la región de la sierra nororiental del estado de Puebla, se encuentra en un entorno con humedad y una masa de neblina procedente del golfo de México, favorece la recolección de agua, a través de un atrapaniebla.

## 3. Objetivo

- Diseñar un nuevo sistema de atrapaniebla utilizando la tecnología, con el fin de su implementación en zonas urbanas y rurales, para captar mayor cantidad de agua para usos agropecuarios u otros.

## 4. Materiales

El diseño del prototipo consiste en optimizar la captación del agua que se encuentra en el ambiente. Una alternativa es implementar un ventilador centrífugo que acelere el flujo de aire por la malla, por la cual se condensará el agua de neblina. Este sistema debe funcionar siempre y cuando exista una humedad relativa mayor o igual al 90%. Pero se debe considerar una activación manual y automática del ventilador, la manera manual se utilizará para verificar el buen estado del ventilador o en el posible caso de que el sistema automático tenga una falla, el usuario pueda activar el motor de manera automática.

Para ello se utilizarán los siguientes materiales:

### 4.1.0 Sensor de temperatura y humedad DHT11

Cuenta con un sensor complejo de temperatura y humedad con una señal de salida digital calibrada. Este sensor incluye un componente de medición de humedad de tipo resistivo y un componente de medición de temperatura NTC (Coeficiente de Temperatura Negativo) por sus siglas en inglés, y se conecta a un microcontrolador de alto rendimiento de 8 bits, ofreciendo excelente calidad, respuesta rápida, capacidad anti-interferencia y rentabilidad.

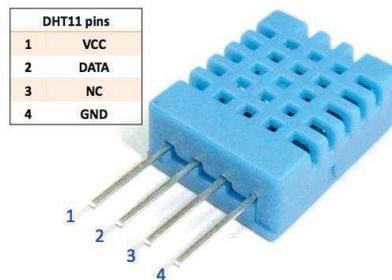


Figura 1. Sensor DHT11

### 4.1.1 Características generales

Sensor	Alimentación	Temperatura	Humedad
DHT11	3.3-5.5V	0-50 °C +/-2°C	20-0%RH +/-5%RH



#### 4.1.2 Funcionamiento del sensor DHT11

Cuando el microcontrolador envía la señal de inicio, el sensor DHT11 pasa del modo de bajo consumo de voltaje al modo de funcionamiento, esperando a que el microcontrolador complete la señal de inicio. Una vez que se completa, el sensor envía una señal de respuesta de datos de 40 bits que incluyen la información de humedad relativa y temperatura al microcontrolador. Los usuarios pueden elegir, recopilar (leer) algunos datos. Sin la señal de inicio del microcontrolador el DHT11 no dará la señal de respuesta al microcontrolador. Una vez que los datos son recolectados, el sensor cambiará al modo de bajo consumo de energía hasta que reciba de nuevo una señal de inicio del Microcontrolador.

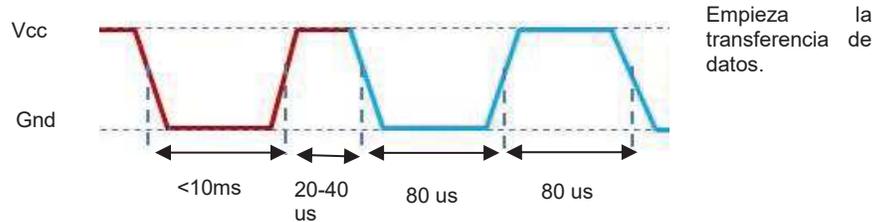


Figura 2. Señal de inicio y respuesta

#### 4.2.0 Arduino uno

El Arduino es una plataforma computacional física (open-source) basada en una simple tarjeta de entradas y salidas (I/O) y un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje Processing/Wiring. El Arduino Uno puede ser utilizado para desarrollar objetos interactivos o puede ser conectado a software de tu computadora (por ejemplo, Flash, Processing, MaxMSP).

##### 4.2.1 Características

- Microcontrolador ATmega328.
- Voltaje de entrada 7-12V.
- 14 pines digitales de I/O (6 salidas PWM).
- 6 entradas análogas.
- 32k de memoria Flash.
- Reloj de 16MHz de velocidad.



Figura 3. Placa Arduino



### 4.3.0 Placa LCD

LCD (sigla del inglés Liquid Crystal Display) es una pantalla delgada y de forma plana formada por un número de píxeles de color o monocromos colocados delante de una fuente de luz o reflectora. El proceso de control de un LCD con Arduino nos abre un frente de interacción visual de la electrónica de un modo rápido, sencillo y eficaz.



Figura 4. Placa LCD

### 4.4.0 Flip-flop D y compuerta lógica

Un Flip-Flop, es fundamentalmente un arreglo de latches temporizados en el que se busca que las salidas respondan a los cambios en las entradas, exclusivamente en los periodos de transición (flancos) de voltaje, ya sean de alto a bajo o de bajo a alto. Mientras que el resto del tiempo conserva su estatus previo.

El Latch más simple es el SR (Set-Reset), que tiene por finalidad poner un 1 en la salida (Set), almacenarlo y borrarlo (Reset). El SR se puede construir con compuertas NOR o NAND.

El flip-flop tipo D es una variante del SR, la entrada S se interconecta a la entrada R a través de un inversor, de tal forma que sus entradas quedan reducidas a una: la terminal D.

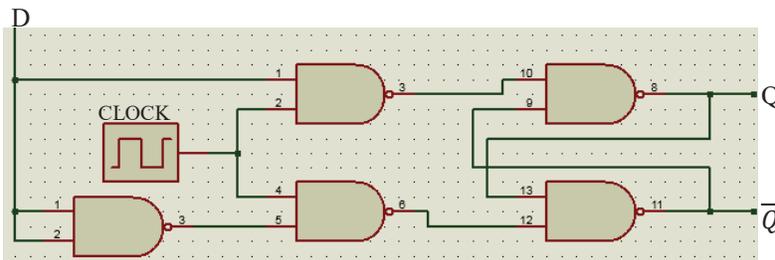


Figura 5. Flip-Flop D.

Tabla de transición

Q	D	Q(t+1)
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

### 4.4.1 Compuerta XOR

La compuerta OR exclusiva u XOR, es una versión de la OR anteriormente vista, en la que se anula la posibilidad de que ambas entradas en 1 den como salida 1. En Álgebra de Boole su expresión sería:  
 $S = ab^{-} + \bar{a}b = a \oplus b$ .

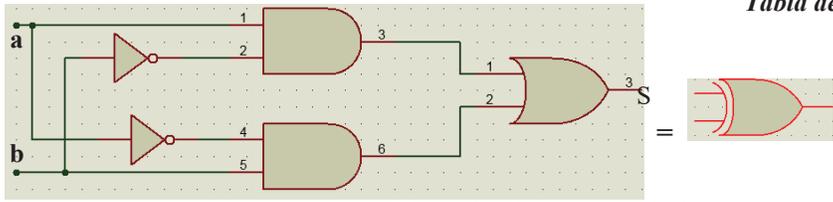


Tabla de verdad de la compuerta XOR

a	b	S
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Figura 6. Compuerta XOR.

#### 4.5.0 Ventilador Centrífugo

Ventilador donde se modifica la dirección del aire en un ángulo de 90°, es decir, el aire entra en el ventilador con un determinado ángulo (80° o 90°) con una dirección axial al plano de giro de las aspas y sale al exterior con un desfase de 90° (0 y 10°) en dirección radial.

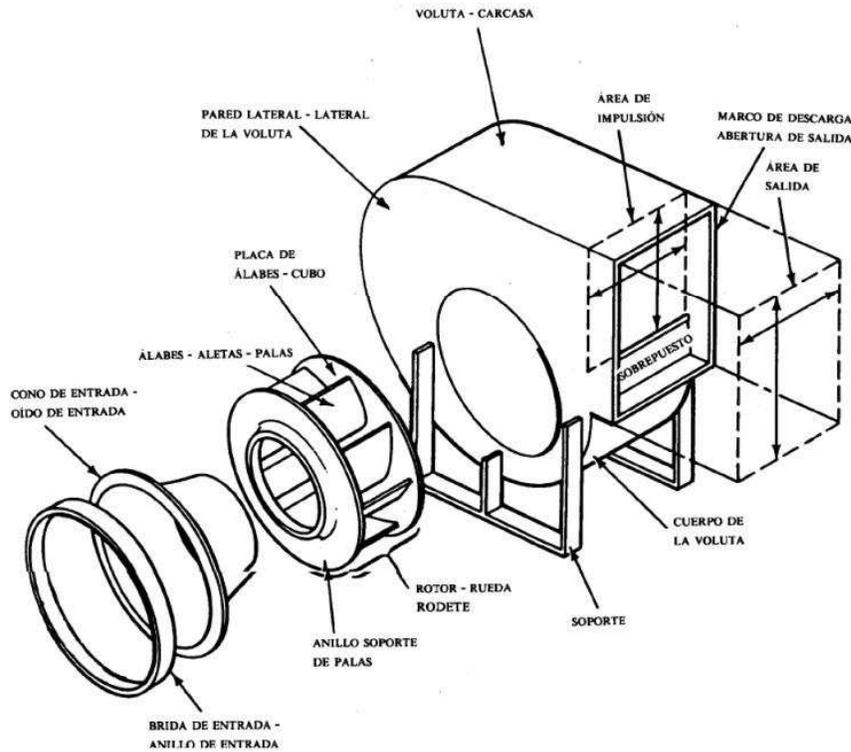


Figura 7. Estructura de un ventilador centrifugo con sus partes

#### 4.5.0 Optoacoplador

El optoacoplador es un circuito integrado compuesto por un diodo LED y un fototransistor unidos de tal forma que cuando una señal eléctrica circula a través del LED haciendo que brille, la luz que emite es recibida por la base del fototransistor.

Se puede utilizar este dispositivo a modo de interfaz entre dos circuitos, de tal forma que quedarían unidos ópticamente, lo que, a efectos de protección del circuito, se traduce en colocar una resistencia de un valor muy alto, lo que lo hace especialmente útil para proteger contra los picos de tensión.

## 5 Metodología

### 5.1.0 Funcionamiento del atrapaniebla tradicional

Los atrapanieblas son un invento para captar las gotas de agua microscópicas que contiene la neblina. Consta de una malla parecida a una red de vóley que se coloca en cerros que albergan neblina. Donde el agua se condensa para después pasar por una canaleta que desemboca a un depósito. Se basa de la siguiente formula:

$$R = \sqrt[8]{\frac{H}{100}} * [112 + (0,9 * T)] + (0,1 * T) - 112$$

$R$  = Punto de rocío  
 $H$  = Humedad relativa  
 $T$  = Temperatura

### 5.2.0 Innovación del atrapaniebla

Se buscará realizar un nuevo diseño del atrapaniebla, considerando días de lluvia y neblina. Intentando considerar las posibles variables presentes y futuras con el fin de trascender con nuestro proyecto. Siguiendo el esquema de la figura 8.

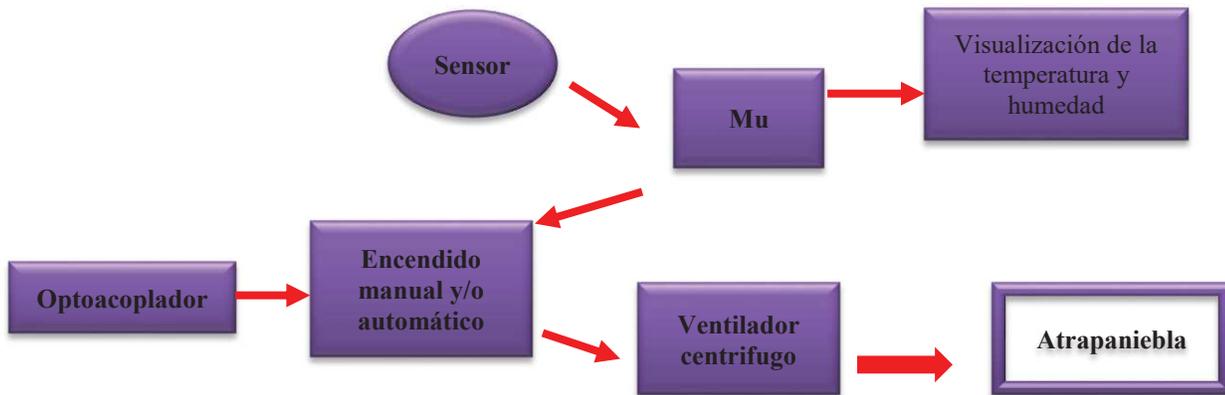


Figura 8. Esquema general del atrapaniebla

### 5.2.1 Implementación de un ventilador centrifugo al atrapaniebla

Cuando el sensor registre el aumento de una humedad relativa mayor o igual a 90%, hará que el arduino mande la señal al sistema de **Encendido manual y/o automático**, activando el ventilador centrifugo, para acelerar el paso del aire en el atrapaniebla. Con lo cual se acelerará la captación de neblina en dicho sistema, se considera la cantidad de masa de aire que captará el ventilador y en qué tiempo podrá trasladarse dicha cantidad de aire, la cual contiene cierta cantidad de agua suspendida en el aire.



### 5.2.2 Encendido automático y/o manual

El sistema de encendido manual consiste en el uso de un optoacoplador con enclave, para poder activar el ventilador centrífugo con solo la señal del control remoto y un push button, esto con o sin necesidad de tener una humedad relativa del 90%, para conocer el estado de funcionamiento del ventilador.

En el encendido automático recibe la señal del arduino para activar el ventilador, solo sucederá siempre y cuando el sensor registre la humedad requerida para activarlo.

Cuando el optoacoplador con enclave y el arduino estén en estado bajo o alto, no debe activarse el sistema. Por lo cual se puede obtener la siguiente tabla de verdad.

O	A	S
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Figura 9. Tabla de verdad.

De la cual se obtiene la siguiente expresión Booleana:

$$S = \bar{O}A + \bar{A}O$$

Obteniendo como resultado una compuerta XOR:  $S = O \oplus A$

#### a) Funcionamiento del optoacoplador con enclave

Cuando se dé mantenimiento al sistema del atrapaniebla o se quiera activar de manera manual para verificar el correcto funcionamiento del motor, este se activará con un control de televisión que mandará la señal infrarroja al fototransistor, que actuara como un tren de pulsos (al presionar y soltar el botón del control) en el pin 3 del flip-flop, a la vez que pulsará el push button que está en el pin 2, para activar el motor. Cuando se desee apagar el ventilador, se pulsará únicamente el control remoto para desactivarlo.

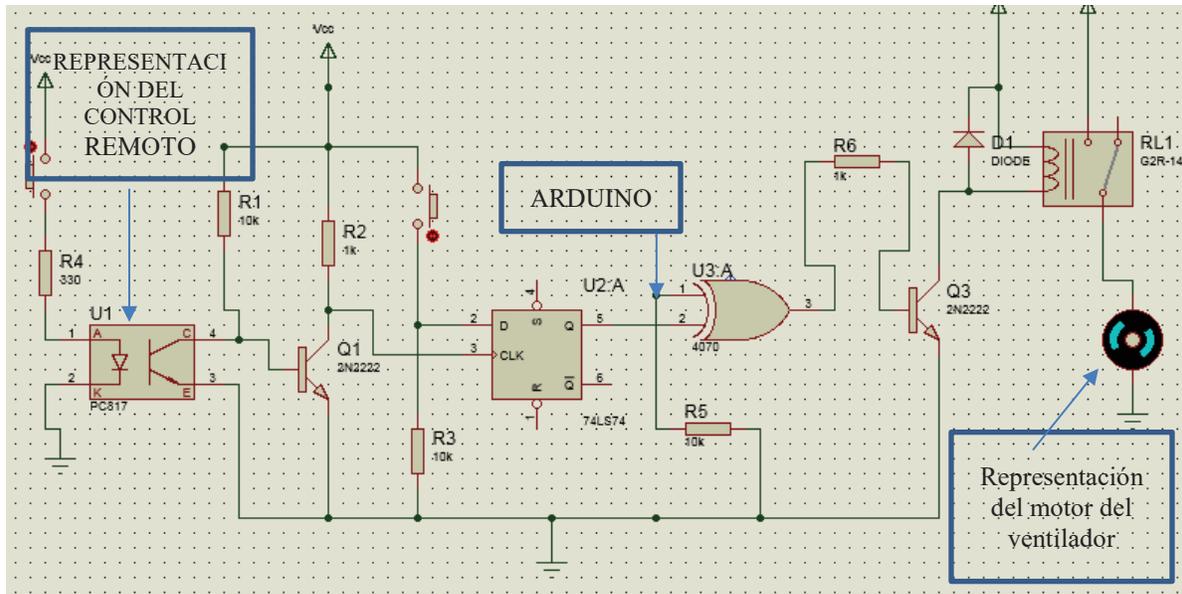


Figura 10. Circuito del optoacoplador y el sistema de seguridad.

### 5.2.3 *Aplicación del arduino en el atrapaniebla*

El ventilador centrífugo está acoplado a un motor de 3/8 de Hp (1720 rpm) de potencia. Este está conectado al circuito que se muestra en la figura 9, la condición que debe tener este motor es que se activará siempre y cuando el sensor registre una humedad relativa mayor o igual a 90% en el ambiente, así cuando la humedad baje este porcentaje el motor se detendrá. Todo esto se verá mostrado en una pantalla LCD la cual le permitirá al usuario tener un conocimiento detallado del atrapaniebla.



Figura 11. Circuito del optoacoplador y el sistema de seguridad.

### 5.2.4 *Innovación del captador de niebla*

El diseño tradicional del atrapaniebla consta de una malla extendida entre dos postes, la innovación que se propone para el atrapaniebla, tiene un cambio para el aprovechamiento de la lluvia teniéndose en cuenta que el diseño es un envase de garrafón, el cual contiene las mallas adentro, de esta manera se logrará almacenar de manera estricta dentro del recipiente. Aprovechando el diseño cónico que tiene en su parte inferior se invierte, para que esa sea la parte superior nueva, aprovechándolo en situaciones de lluvia y la parte donde se introducía el agua sea ahora la salida de este sistema.



Figura 12. Captador de niebla desarmable del sistema de Mantenimiento y de activación.

## 6. Resultados

Al realizarse las primeras pruebas con el atrapaniebla modificado, cuyas especificaciones ya se explicaron anteriormente, se llegó a un resultado favorable, se colocó el prototipo en un día de abundante neblina y con presencia de lluvia moderada, obteniendo como resultado la captación de 3 litros de agua en aproximadamente  $\frac{1}{2}$  hora. Los resultados obtenidos fueron aceptables para la primera prueba realizada con el atrapaniebla tradicional modificado.



Figura 13. Agua captada durante la prueba del diseño.

## 7. Conclusiones

A partir de las investigaciones realizadas, pueden desprenderse varias conclusiones presentadas a continuación:

Bajo la tecnología actual a la que se está sometiendo el atrapaniebla, el volumen de agua captable es suficiente para varias aplicaciones prácticas ya que se está contemplando tanto el agua generada por neblina como el de lluvia, acelerados por medio de esta misma tecnología (figura 13).

Siendo un proyecto que no afecta al ecosistema, debido a que no depende de ningún manto acuífero. Además de tener un sistema automático y/o manual de activación que le dará un fácil uso al operario, y así como una placa LCD donde se podrá visualizar la humedad relativa y la temperatura, datos importantes para la activación del ventilador.

Esto permitirá que en la zona localizada en la parte nororiental de Puebla pueda abastecerse de agua para el uso doméstico o agrícola sin tener que usar el agua potable, haciendo que las comunidades puedan proveerse de agua gracias a sus condiciones climáticas que los benefician.



Figura 14. Prototipo de atrapaniebla.



## Referencias

- [1] D-Roboics UK. “DHT11 Humidity & Temperature Sensor”, [www.droboticsonline.com](http://www.droboticsonline.com). 9 págs., 30 de julio del 2010.
- [2] Pomares J. “Manual de Arduino”, Grupo de Innovacion Educativa en Automática, 9 págs., 2009
- [3] Salvador Escoda S.A. “Manual práctico de ventilación”, S&P, 2<sup>da</sup> Edición, 137 págs.
- [4] Morris M. “Lógica digital y diseño de computadores”, Prentice Hall, 240 págs



# Métodos de Automatización en PLC para Procesos Secuenciales

Méndez Guzmán Hugo Antonio, Jaramillo Chávez Esmeralda Lucero,  
Paz Vega José Giovanni, Rivera Quezada Carlos Arturo

Ingeniería Robótica, Universidad Politécnica del Bicentenario (UPB),  
Carretera Estatal Silao-Romita km. 2, San Juan de los Duran, Silao, Gto., México.  
hmendezg@upbicentenario.edu.mx

## Resumen

*Dentro de los procesos de manufactura, existen máquinas cuyo funcionamiento se define a través de secuencias de mecanismos basados en electro-neumática y electro-hidráulica.*

*Dado lo anterior, es de vital importancia la interpretación de diagramas de movimientos, el conocimiento de la forma de actuar de un sensor en un proceso, así como el comportamiento de distribuidores y actuadores de un sistema para desarrollar la lógica que se implementará a un PLC para la automatización de un proceso secuencial.*

*Este trabajo propone una metodología de diseño de automatismos secuenciales basados en métodos clásicos electro-neumáticos y su adaptación a PLC. Así mismo presenta la solución de automatismos que cuentan con una descripción de movimientos a través de diagramas espacio-fase y la consideración del estado de sensores en un ciclo de trabajo, para la generación de diagramas ladder que se implementan en un PLC.*

*De igual manera se describen una comparativa funcional entre los métodos expuestos, vistos desde un punto de adaptabilidad para secuencias basadas en actuadores de simple y doble efecto.*

**Palabras clave:** PLC, Circuitos neumáticos, Programación Ladder, Diagramas espacio-fase, Modelado de sistemas.

## 1. Introducción

En la industria es cada vez más común el uso de maquina secuenciales para el desarrollo de un producto, tales como procesos de estampado, empaquetado, dispositivos de corte, etc., procesos los cuáles se implementan en formas muy simple. Sin embargo, si se tratase de procesos en donde estos se combinan para desarrollar una secuencia más completa o el ciclo de trabajo está compuesto por muchas operaciones es necesario conocer muy a fondo el comportamiento parcial de cada etapa como el comportamiento total de un proceso.

Para realizar una automatización en un proceso es necesario conocer de forma concreta el funcionamiento de una máquina, siendo vital una representación secuencial o combinacional del proceso. En el caso de máquinas secuenciales electro-neumáticas es indispensable llevar un sistema de representación que permita visualizar adecuadamente cada una de las etapas de la secuencia tanto en sensores como actuadores, ya que conociendo la forma como se comportan los actuadores podremos proporcionar o generar las ordenes de mando a sus distribuidores adecuadas para controlar el flujo de movimientos en una secuencia.



## 2. Representación de Automatismos

Entre las principales formas de representación se encuentran el sistema simplificado y los diagramas espacio-fase, el primero representa el movimiento de una forma muy general, mientras el segundo puede especificar a detalle la relación entre sensores y actuadores del proceso y las fases o etapas que conforman un ciclo máquina [1].

### 2.1 Sistema Simplificado

Este sistema permite la descripción metódica de un automatismo, ya que hace referencia a los movimientos de una máquina teniendo en cuenta el orden en que suceden [2], tal que un cilindro que se mueve en el sentido en que sale el vástago se dice que va a (+) y cuando este va en sentido que el vástago entra se dice que va a (-).

Por ejemplo, una máquina de taladro cuyo avance es mandado por un cilindro neumático (actuador A), perfora con una broca una pieza que se sujeta por medio de una mordaza neumática accionada por otro cilindro (actuador B) debe realizar el ciclo:

- Cerrar mordaza, fijando la pieza.
- Avanzar máquina de taladrar.
- Retroceder máquina de taladrar.
- Abrir mordaza

El ciclo de trabajo se puede representar por el sistema simplificado como:

$$B+ / A+ / A- / B- \quad (1)$$

Sin embargo este sistema no precisa si el ciclo es manual o automático, no se sabe cuándo acaba el ciclo, si el ciclo es continuo, etc.

### 2.2 Diagramas Espacio-Fase

El diagrama espacio-fase expresa de forma gráfica la operación de actuadores y la interacción en los movimientos de los mismos. Su finalidad es mostrar la información de las operaciones entre estos tal como avance y retroceso de cilindros y su relación entre movimientos. La figura 1 muestra el diagrama espacio-fase para dos cilindros neumáticos, donde avance y retroceso de cada uno de ellos está representado por las líneas inclinadas que van de '0' a '1' y '1' a '0' respectivamente. Así mismo las líneas horizontales representan el mantenimiento de la posición de un cilindro ya sea en posición extendido (1 lógico) o retraído (0 lógico).

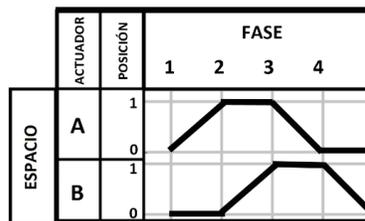


Figura 1. Diagrama espacio-fase para dos actuadores.

Sin embargo, al igual que el sistema simplificado carece de información respecto a si sistema tiene arranque manual o automático, es cíclico o solo produce un ciclo de trabajo por arranque, etc. El diagrama espacio-fase de la figura 2 a comparación de la anterior, muestra una dependencia entre los



actuadores, tal que muestra gráficamente que cuando el actuador A llega a la posición extendido se inicia el avance del actuador B, en forma consecuente cuando el actuador B llega a la posición extendido marca el retorno del actuador A, y a su vez cuando este llega a posición retraído marca el retroceso del actuador B, finalmente la figura hace alusión a ser un proceso cíclico enlazando el retorno del actuador B con el avance del actuador A.

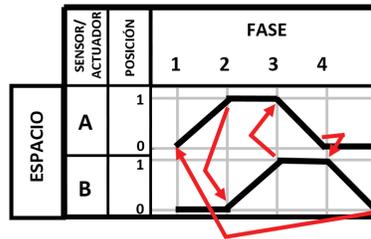


Figura 2. Diagrama espacio-fase mostrando la interconexión entre dos actuadores.

### 3. Métodos de Automatización empleados en PLC

La automatización por medio de PLC presenta innumerables variaciones, ya que dependiendo del modelo de PLC y su software, se presentan capacidades limitadas o expandidas y sin contar además la elección del lenguaje de programación.

Para algunos programadores, la tarea de automatizar puede ser intuitivo a través de la experiencia, sin embargo es conveniente definir métodos sistemáticos que permitan el diseño de automatismos y sus posibles errores en la ejecución de secuencias deseadas de operación [3].

Entre los principales métodos mencionados en electro-neumática para este fin se encuentran el método intuitivo, paso a paso y cascada, sin embargo también pueden ser usados métodos que se enfocan en el estado de actuadores y sensores en cada etapa para producir ordenes de mando hacia los distribuidores de los actuadores y aprovechando las herramientas de programación que nos ofrecen comúnmente los PLC.

Supóngase que se desea generar un diagrama de lógica escalera para automatizar la secuencia de tres cilindros neumáticos, en primera instancia se debe tener en cuenta las diferencias de conexión y las válvulas direccionales requeridas si esto se desea para cilindros de simple o doble efecto. La figura 3 muestra las diferencias de componentes y conexión electro-neumáticas para cilindros de doble (figura 3a) y simple efecto (figura 3b).

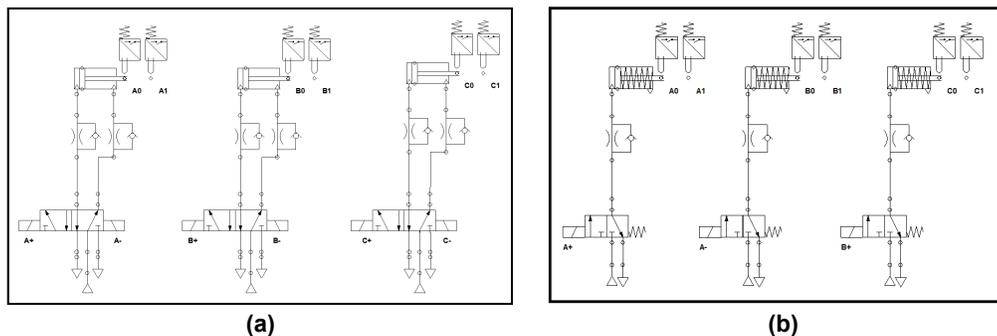
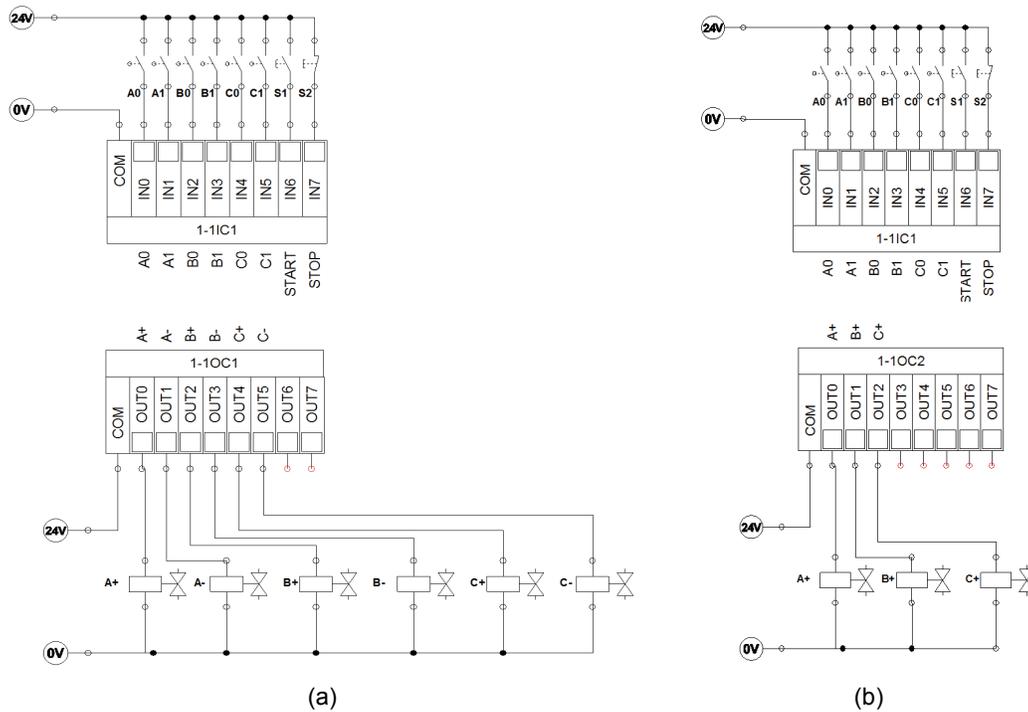


Figura 3. Esquema de conexión electro-neumática para tres cilindros, (a) Esquema de conexión electro-neumática para distribuidores de doble efecto, (b) Esquema de conexión electro-neumática para distribuidores de simple efecto.



Como se puede apreciar en la figura anterior para controlar el movimiento, en el caso de cilindros de doble efecto pueden usarse válvulas biestables, recordando que para producir movimiento solo deberá activarse eléctricamente uno de sus solenoides para producir el cambio de flujo del aire entre avance y retroceso del cilindro de lo contrario la válvula permanecerá en la última posición alcanzada. Por otra parte para cilindros de simple efecto pueden usarse válvulas con un solo accionamiento eléctrico y retorno por muelle, por lo que mientras su solenoide se encuentre energizado este permanecerá en avance y al des-energizarse será retornada por efecto del muelle interno.

Así mismo para poder llevar el control eléctrico de dichos actuadores la forma de conexión hacia el PLC variara de acuerdo a lo que se muestra en la figura 4.



**Figura 4. Esquema de Entradas-Salidas digitales para tres cilindros, (a) Esquema Entradas-Salidas digitales para distribuidores de doble efecto, (b) Esquema Entradas-Salidas digitales para distribuidores de simple efecto.**

Una vez hecho los esquemas principales de conexión eléctrica y electro-neumática, se puede proceder a un método sistemático para producir el esquema de control eléctrico a través de lógica de escalera mediante PLC.

### 3.1 Método Intuitivo

El método intuitivo consiste en asignación de un sensor para las posiciones en que el vástago se encuentra extraído o retraído en cada actuador (generalmente de doble efecto), tal que dada una secuencia, el movimiento de un actuador es producido por el sensor que marca fin al movimiento anterior. En la figura 5 se muestra una secuencia donde la activación del avance del distribuidor A es marcada por el sensor C0 que determina que el actuador C ya ha llegado a su posición de retracción, así como la activación del avance del actuador B a través del sensor de posición A1. Esta misma lógica se desarrolla para cada actuador en la secuencia.

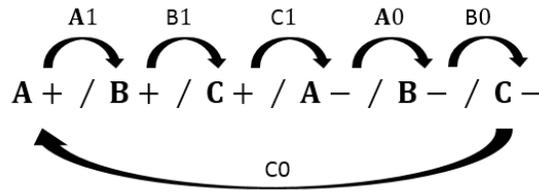


Figura 5. Lógica de conexión basada en método intuitivo.

En la figura 6, la conexión es prácticamente directa una vez que se ha asignado la relación ‘movimiento actual de un actuador’-‘sensor que marca fin al movimiento anterior’. Sin embargo este método presenta complicaciones en secuencias complejas cuando las señales de activación de los distribuidores de avance y retroceso de un actuador se traslapan, evitando que el mecanismo continúe la secuencia de movimiento, por lo que su uso es recomendado para secuencias muy simples.

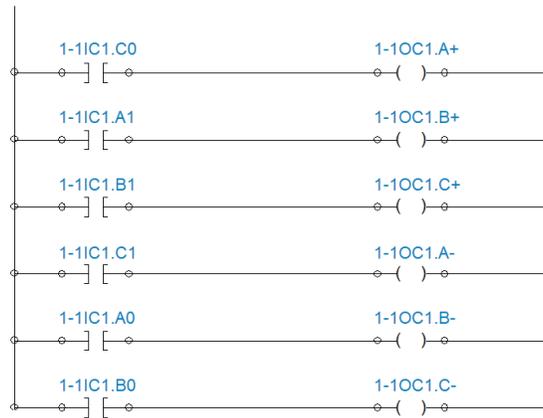


Figura 6. Diagrama ladder solución a la secuencia de la figura 5 por método intuitivo.

### 3.2 Solución lógica usando Diagramas de Estado y Diagramas Espacio-Fase

Un diagrama de estado es un gráfico el cuál detalla la forma en que los actuadores (salidas) y sensores (entradas) de un sistema secuencial se comportan durante un ciclo de trabajo [4]. Este nos permite establecer una relación de dependencia entre los sensores y actuadores, llevándonos a la formulación de ecuaciones lógicas para la solución de la secuencia. Supóngase una secuencia dada por:

$$A+ / B+ / \begin{matrix} A- \\ C- \end{matrix} / B- / C- \quad (2)$$

donde las señales de activación de sus distribuidores de doble y simple efecto se muestran en la figura 7.

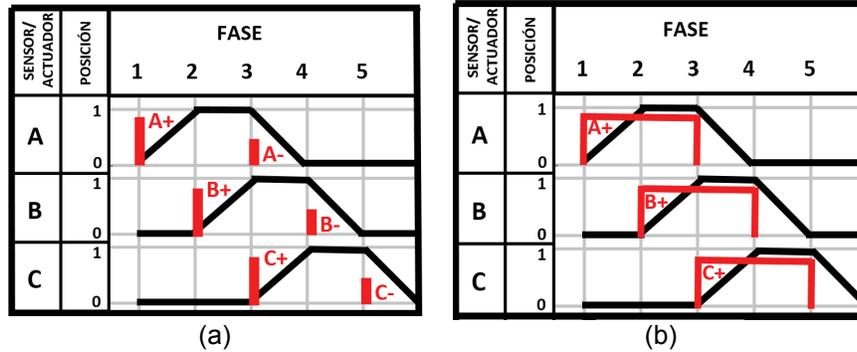


Figura 7. Diagrama espacio-fase de la secuencia ecuación 2, (a) Señales de activación para distribuidores de doble efecto, (b) Señales de activación para distribuidores de simple efecto.

Tomando en cuenta que para cada actuador existe un sensor de proximidad mecánico u óptico para determinar su posición, se puede realizar un diagrama de estado determinando como '1' y '0' lógico cuando el actuador se encuentra extendido o retraído respectivamente para cada fase, tal que a través de relaciones lógicas básicas se pueda determinar la ecuación lógica necesaria para generar la activación de los distribuidores sin generar traslape entre las señales de avance y retroceso (A+ y A- por ejemplo) y evitando la interrupción mecánica del movimiento. La figura 8 muestra el análisis de estado de los sensores y la ecuación lógica necesaria para producir las activaciones en los distribuidores de doble (figura 8a) y simple efecto (figura 8b) con respecto al diagrama espacio-fase de la figura 7.

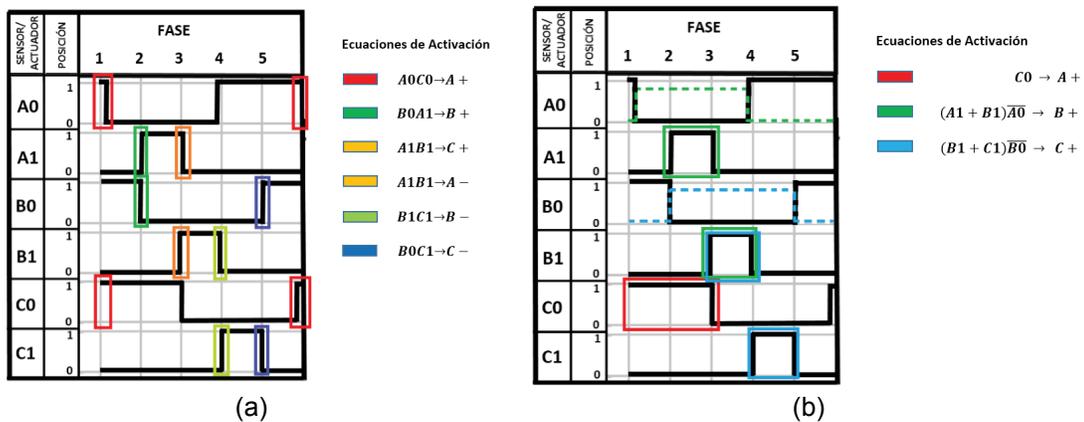
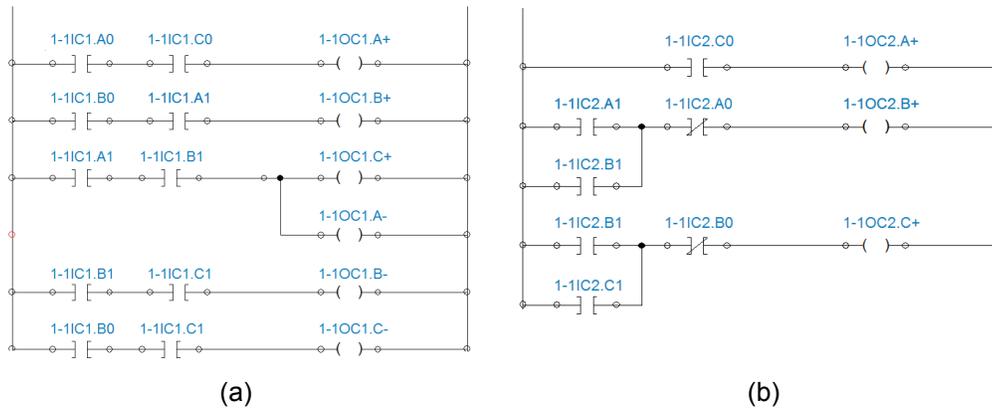


Figura 8. Diagrama de estado de los sensores de la secuencia ecuación 2, (a) Análisis de estados y generación de señales de activación para distribuidores de doble efecto, (b) Análisis de estados y generación de señales de activación para distribuidores de simple efecto.

Nótese como en el caso de actuadores de simple efecto (figura 8b), la solución de un distribuidor está dada por una situación de enclavamiento entre el actuador B+ y su fin de carrera B1 y una situación de desenclavamiento por A0, ya que para que B efectúe su movimiento es necesario que el cilindro A se extienda produciendo la activación de A1; una vez que el cilindro B se extiende produce la activación de B1 y por ende una situación de auto-enclavamiento. Para eliminar este enclavamiento es necesario multiplicar la ecuación por la señal testada de A0, de modo contrario el mecanismo permanecería estático a partir de la extensión del cilindro B. De forma similar ocurre en el análisis de estado de los sensores que intervienen en la activación del distribuidor del cilindro C.



Finalmente, el programa en ladder para los casos de distribuidores simple efecto y doble efecto asignados al PLC se muestran en la figura 9a y 9b.



**Figura 9. Diagrama ladder solución a la secuencia ecuación 2, (a) Solución para distribuidores de doble efecto, (b) Solución para distribuidores de simple efecto.**

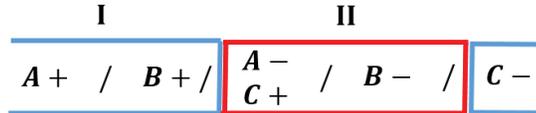
### 3.3 Método Paso a Paso Mínimo y Cascada

Los métodos paso a paso y cascada son ampliamente recomendables para secuencias complejas, ya que ofrecen un método de solución en el cuál una secuencia es dividida por etapas, estableciendo una memoria por etapa y condiciones para evitar la generación de señales de mando que se traslapen en la activación del avance y retroceso de los distribuidores.

La metodología general para aplicarlos se puede resumir en las siguientes reglas:

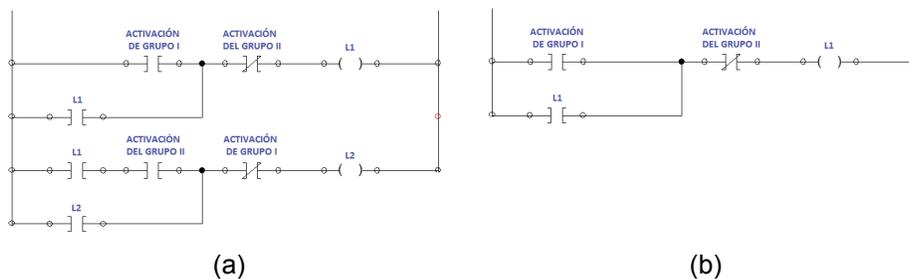
1. Dividir la secuencia de trabajo en grupos, donde no haya coincidencia de letras iguales. Tomando en cuenta que si en el último grupo hay una letra que no esté en el primero, está pasara al primer grupo.
2. Dibujar los cilindros que intervengan en el ciclo con sus correspondientes distribuidores de mando.
3. Para el método paso a paso se colocan tantas memorias como grupos de corriente. Para el método cascada se coloca una memoria menos que el paso a paso.
4. Colocar tantas líneas de corriente como grupos.
5. A cada posición del cilindro, le corresponde una señal en su distribuidor y una posición del fin de carrera.
6. Las primeras señales en el distribuidor de cada grupo toman corriente directa de su línea de corriente (grupo).
7. Los primeros fines de carrera de cada grupo, toman corriente de su línea de corriente (grupo).
8. Las siguientes señales de cada grupo toman corriente del anterior fin de carrera.
9. Los últimos fines de carrera de cada grupo, dan corriente a las memorias correspondientes para que cambie la corriente al grupo siguiente.
10. La desactivación de las memorias se hace a través del grupo siguiente a la orden de mando actual.

La figura 10 muestra la forma en que se agrupan las secuencias de la ecuación 2 tomando como referencia la regla 1.



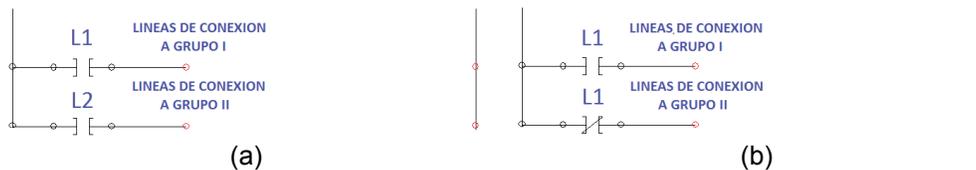
**Figura 10. Estructura de grupos de la secuencia de la ecuación 2.**

En la figura 11a se puede apreciar como en el método paso a paso se genera una memoria para cada grupo, donde las condiciones de activación de un grupo son las condiciones de desactivación del grupo anterior, además de tener como condición adicional para activar del grupo 2 en adelante la condición de haber estado en el grupo anterior. Con respecto al método cascada se puede apreciar que si el caso solo conlleva dos grupos, es suficiente el uso de una sola memoria (figura 11b), para tres grupos o más se agregarían memorias adicionales similares al segundo renglón del diagrama ladder del método paso a paso (figura 11a).



**Figura 11. Líneas de corriente para solución a la secuencia ecuación 2, (a) Estructura de líneas para método paso a paso, (b) Estructura de líneas para método cascada.**

En la figura 12 se muestra como se genera las líneas de acción para cada grupo, nótese como en el método paso a paso es necesario que la memoria de un grupo sea activada para iniciar una secuencia, mientras en el método cascada existe una línea que comienza con un contacto normalmente cerrado y por lo que la secuencia comienza por este medio, incluso si las memorias en el PLC comienzan con un '0' lógico en cuanto se pone en marcha.



**Figura 12. Estructura de memorias para solución a la secuencia ecuación 2, (a) Estructura de memorias para método paso a paso, (b) Estructura de memorias para método cascada.**

Los métodos paso a paso y cascada se pueden interpretar de una manera más sencilla con la generación de una tabla de trabajo (Tabla 1), donde se especifican la secuencia, grupo al que pertenecen, etiqueta con la cuál es referenciada una salida del PLC en su tabla de símbolos (columna distribuidor de la tabla 1) y los fines de carrera que marcan el cumplimiento del movimiento de cada secuencia. Además cada una de las reglas antes mencionadas se pueden marcar en la tabla de trabajo mostrando directamente la forma de conexión eléctrica que tomarán sensores, distribuidores y memorias en el programa ladder del PLC.

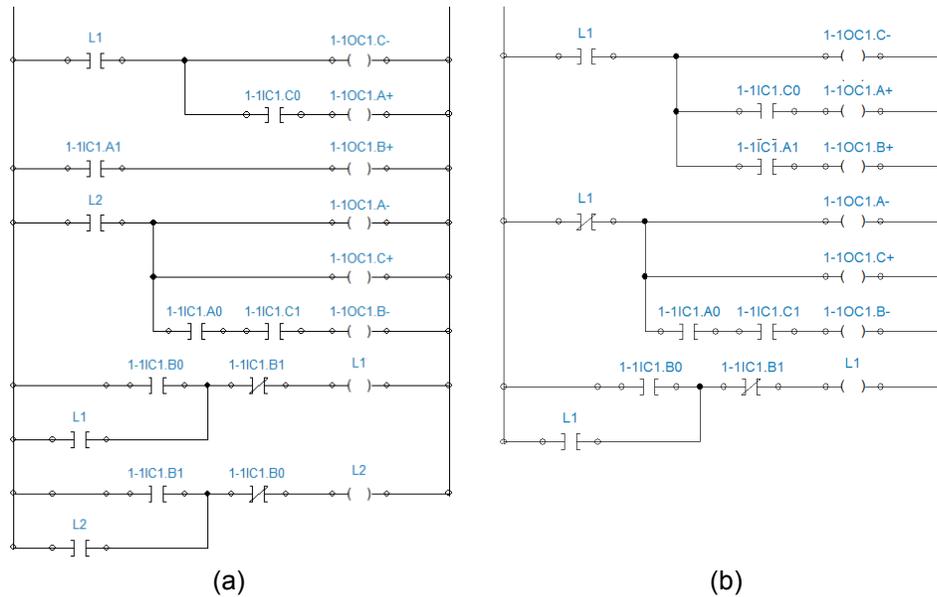


**Tabla 1. Tabla de trabajo generada de la secuencia de la ecuación 2 a partir de los métodos paso a paso y cascada.**

Secuencia	Grupo	Señal en el Distribuidor	Fin de Carrera
C-	I	C-	C0
A+		A+	A1
B+		B+	B1
A-	II	A-	A0 & C1
C+		C+	
B-		B-	B0

- Regla 6
- Regla 7
- Regla 8
- Regla 9

Una vez interpretada la tabla de trabajo y considerada la estructura de memoria dependiendo del método, las asignaciones de la tabla tomarán forma en el diagrama ladder, tal y como se muestra en la figura 13.



**Figura 13. Diagrama ladder para solución a la secuencia ecuación 2, (a) Solución por método paso a paso, (b) Solución por método cascada.**

### 3.4 Uso de Flancos y Memorias

Cuando se desarrollan secuencias complejas es frecuente la aparición de activaciones prolongadas en los sensores, dando a lugar ecuaciones lógicas que se traslapan en la activación del avance y retroceso de un actuador, esta situación también es corregible a través del uso de detectores de flanco e instrucciones SET-RESET.



Un detector de flanco es un elemento que convierte una señal continua en un impulso de 1 Scan (1 lectura de programa) de duración [5].

La solución de un automatismo para actuadores de doble efecto puede ser solucionado aplicando detectores de flanco positivo y auxiliado por el uso del diagrama de estado de los sensores (figura 14a), sin embargo, se debe tener en consideración de que se pueden producir flancos no deseados en la lectura de memoria de entrada, ya que cuando inicia el PLC el estado de las memorias internas puede estar en '0' lógico y una vez hecha la adquisición del estado actual cambiar a '1' lógico. El diagrama de estado de la figura 14a es similar al de la figura 8a, con la única diferencia de la aparición de un flanco positivo (flecha verde) en la señal del sensor B0 y A0.

Una vez hecho el diagrama de estado contemplando estas consideraciones, el método consiste en asignar las activaciones de un distribuidor por la detección de flancos de los sensores correspondientes a los demás actuadores.

Por otra parte, para la solución de un automatismo con actuadores de simple efecto, se puede llevar la activación de la señal de los distribuidores a partir de instrucciones SET y RESET. Las instrucciones SET que activaran un distribuidor se generaran a partir de las señales de los sensores correspondientes a los demás distribuidores y los cuáles se acoplen al inicio de la transición requerida para el distribuidor analizado, cuidando que la señal no se propague más allá del tiempo de activación de dicho distribuidor. Las instrucciones RESET que desactivaran un distribuidor se generan de igual forma con las instrucciones RESET con la diferencia de que están se deben acoplar a la transición de desactivación del distribuidor analizado.

En la figura 14b se muestra la relación de activación de distribuidores con asignaciones SET (flechas azules) y asignaciones RESET (flechas verdes). Cabe mencionar que para la solución bajo este método es necesario verificar si hay traslapes en las señales SET y RESET asignadas, ya que como se sabe en un programa ladder, el PLC da prioridad a la última línea leída, asignando sus resultados a la memoria de salida, por lo que si hay un traslape el PLC dará prioridad a aquella instrucción que se haya generado como última entre instrucciones SET y RESET que direccionen a un actuador.

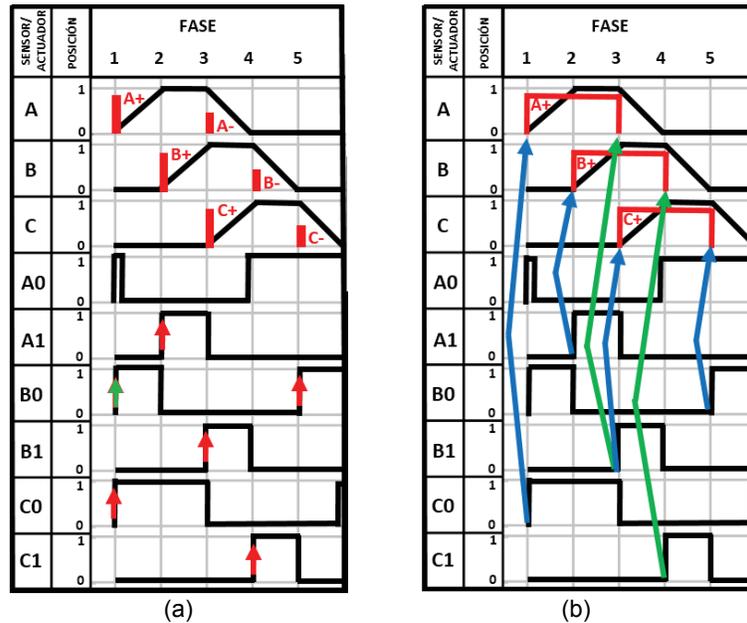
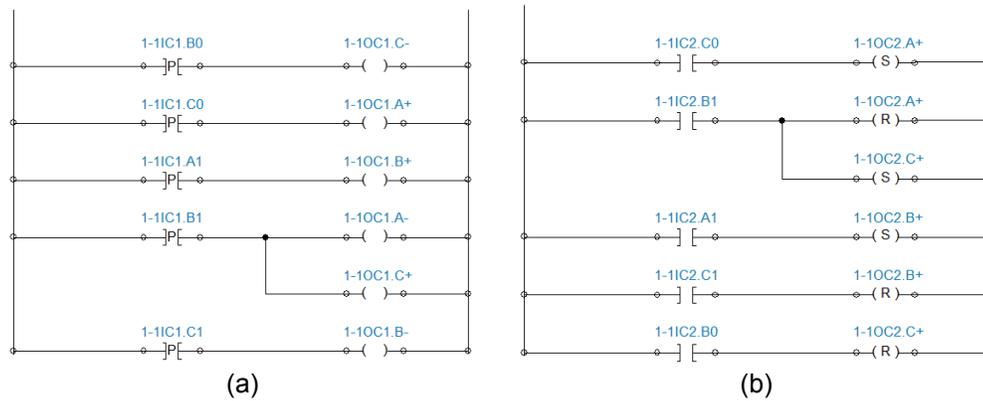


Figura 14. Análisis de estados para solución a la secuencia ecuación 2, (a) Solución para actuadores de doble efecto a través de activaciones por Flanco Positivo (Flechas rojas), (b) Solución para actuadores de simple efecto a través de activaciones SET (Flechas azules) y RESET (flechas verdes).



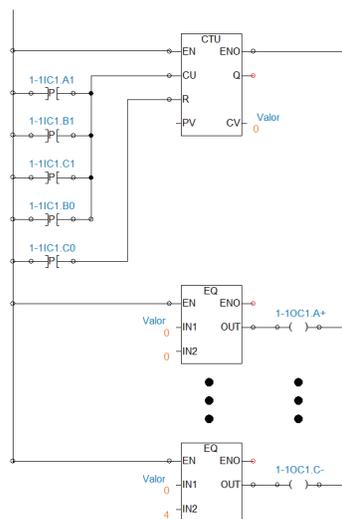
Como se puede apreciar en el diagrama ladder de la figura 15a, la activación de cada distribuidor se hace a través de la detección de flancos en los sensores que no tienen que ver con el directamente. De igual manera la figura 15b muestra la asignación de instrucciones SET y RESET para activación y desactivación de un distribuidor conforme a lo anteriormente explicado y lo referente a la figura 14b.



**Figura 15. Diagrama ladder para solución a la secuencia ecuación 2, (a) Solución para actuadores de doble efecto, (b) Solución para actuadores de simple efecto.**

### 3.5 Conteo de Fases

Otra estrategia para llevar a cabo un proceso secuencial es el uso de contadores de impulso y comparadores, donde se configura un contador incremental para llevar una cuenta desde 0 hasta  $N-1$  fases, donde a partir de un diagrama de estado y la detección de flancos como el de la figura 14a se asigna un flanco que ocurra una sola vez y al comienzo del ciclo de trabajo como señal de RESET hacia el contador y los demás flancos se unen para producir el cambio de cuenta del contador incremental (figura 16). Así mismo se asigna un comparador por fase para las activaciones de los distribuidores, realizando la comparación entre la cuenta que lleva el comparador y la correspondiente fase.



**Figura 16. Solución a la secuencia de la ecuación 2 a través de un conteo de fases.**



## 4. Caso de Estudio

Se trata de una máquina cuya finalidad consiste en formar piezas mediante moldeo por inyección (figura 17) y su posterior traslado a otras partes de la cadena de montaje a través de una serie de articulaciones mecanizadas [6].

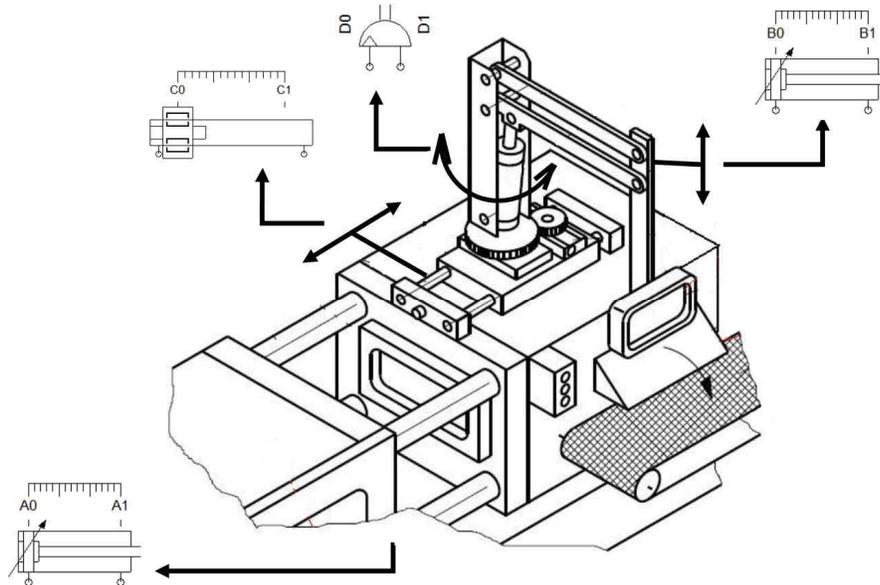


Figura 17. Máquina de moldeo por inyección.

El movimiento que realiza es el siguiente:

1. Inicialmente, se procede a la formación de la pieza por moldeo. Para ello, el cilindro que llamaremos A, se desplazará hacia el cuerpo de nuestra máquina y aguanta un tiempo determinado para la producción de la pieza, en este caso, hemos tomado un tiempo de 5 segundos. Después de este tiempo, la pieza ya estará formada y el cilindro A volverá a su estado inicial.
2. El brazo robot, el cual consta de un cilindro neumático interior B, desciende verticalmente hasta la posición media de la pieza.
3. Posteriormente, dicho brazo es desplazado horizontalmente, mediante un actuador lineal C, para acercarse a la pieza y dejar la ventosa pegada a ella.
4. La ventosa succiona al molde y a continuación, el brazo robot, vuelve a su estado inicial, es decir, el cilindro C se desplaza horizontalmente y después, el B subirá todo lo necesario para no chocar al girar.
5. Dicho brazo, gira 90°, colocando la pieza sobre la rampa.
6. La pieza es soltada y tras desplazarse por la rampa cae sobre la cinta transportadora.
7. Se acciona la cinta transportadora al detectar la pieza.
8. El brazo vuelve a su situación inicial y la cinta se para.

### 4.1 Análisis de la secuencia y soluciones

Dada la naturaleza del problema, para la solución inicial se puede dar recurriendo al método intuitivo para después hacer modificaciones sobre las consideraciones de tiempos de espera y activación y desactivación de la ventosa y motor de la banda transportadora, donde la secuencia acorde al problema inicial estaría dada por la figura 18.

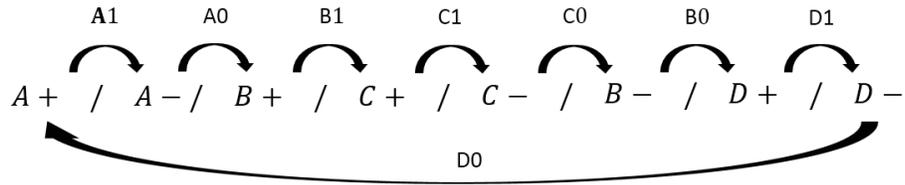


Figura 18. Lógica de conexión basada en método intuitivo para el caso de estudio.

La figura 18 muestra un esquema simple de conexión, pero como se mencionó antes este esquema puede presentar complicaciones en la activación de actuadores controlados a través de distribuidores monoestables o biestables.

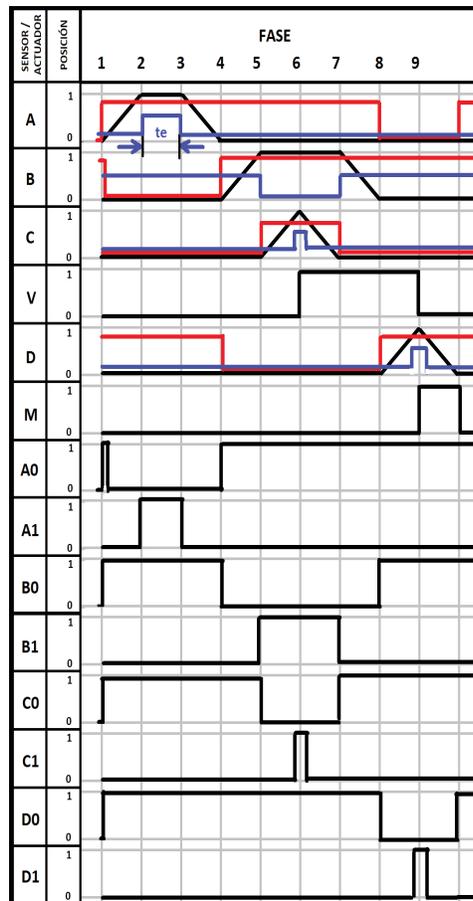
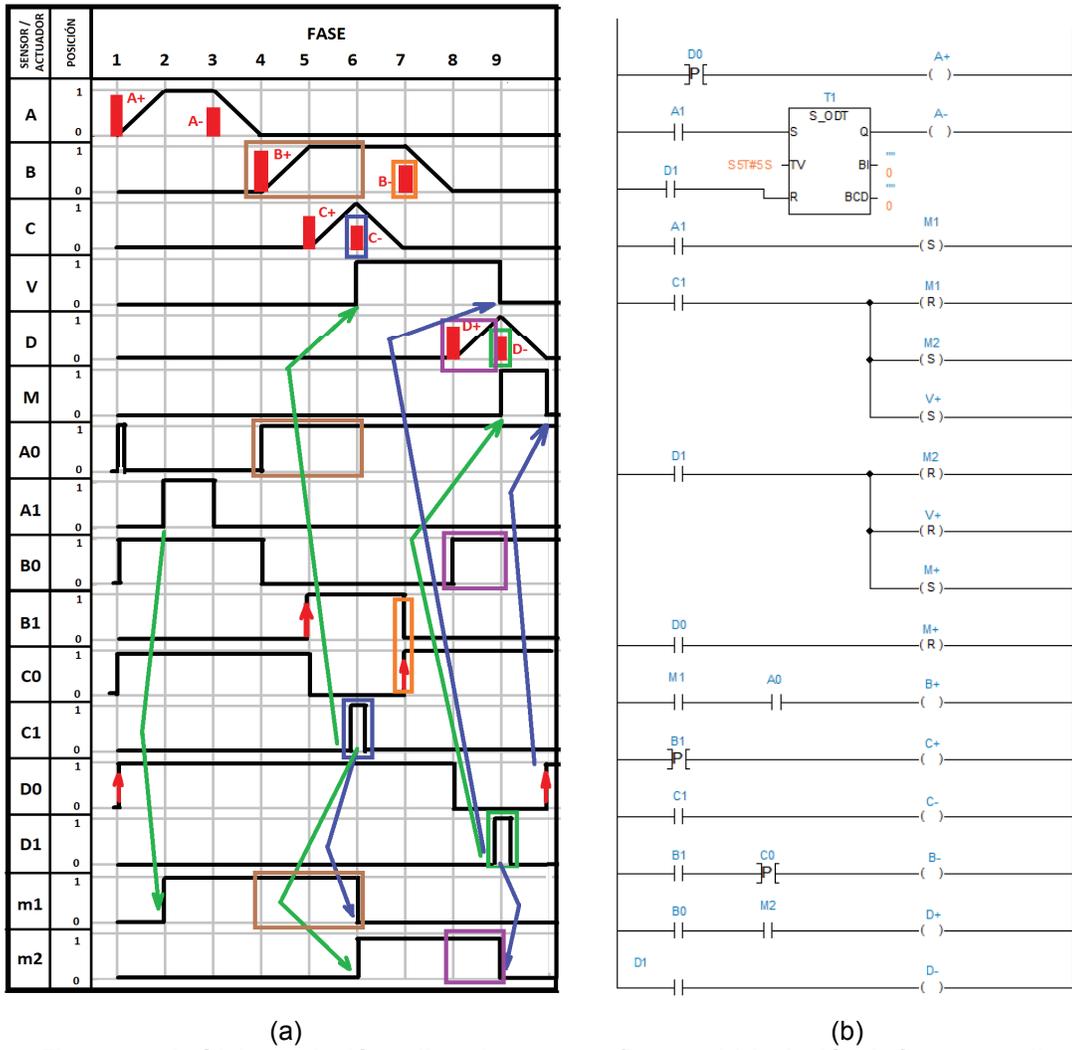


Figura 19. Análisis de caso a través de diagrama espacio-fase y diagrama de estados incluyendo tiempo de espera ( $t_e$ ), ventosa ( $V$ ) y motor eléctrico de la banda transportadora ( $M$ ).

Como se aprecia en la figura 19, la relación entre sensores y distribuidores no es directa, ya que en el análisis de estado se presentan obstrucciones mecánicas por el traslape en las activaciones y desactivaciones a los mismos por lo que es necesario recurrir a otro método, tal como marcas y flancos o una estructura organizada como los métodos paso a paso y cascada.



(a) (b)  
**Figura 20. Análisis y solución aplicando marcas y flancos, (a) Inclusión de flancos en diagrama espacio-fase, (b) Diagrama ladder solución.**

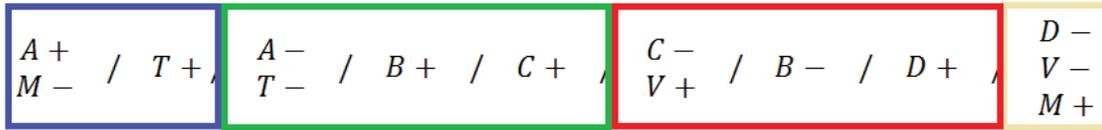
Expanding the analysis of the problem through a phase space diagram and establishing the signals that are required in the control distributors for the actuators A, B, C, D and V, M as movement elements, blower and motor of the conveyor belt respectively, it is found the need to implement the memories m1 and m2 to generate the activation and deactivation conditions, as well as the use of edge detectors and SET-RESET instructions.

The figure 20a shows in colored boxes the logical conditions to execute the order of command in the distributors B+, B-, C-, D+ and D-; the green arrows refer to the orders of command that require SET instructions, while the blue arrows refer to the RESET instructions; the orders of command activated by detection of positive edges are indicated by red arrows. It should be mentioned that for the transition from A+ to A- it is necessary to use a timer T1 with delay to the connection to comply with the requirement of the waiting time. The ladder logic solution to the problem is shown in figure 20b.

This same problem can be solved through the step-by-step or cascade method, establishing in a work table the relationship between sensors and actuators of the system based on the



secuencia completa, inclusive adhiriendo el Temporizador T1, la ventosa V y el motor M de la banda transportadora como si fueran actuadores neumáticos.



**Figura 21. Estructura de grupos de la secuencia de la máquina de moldeo.**

Como se puede apreciar en la secuencia de la figura 21 la activación y desactivación del motor y ventosa están asignados como M+ y M- para el motor, así como V+ y V- para la ventosa, mientras la señal de activación que va al temporizador es denominada como T+ y su salida T1. Una vez agregados a la secuencia original se procede a la formación de grupos.

A diferencia de una aplicación básica, para la realización de la tabla de trabajo solo se consideran como señales en los distribuidores los elementos positivos de activación de motores, ventosa y temporizadores, ya que son automáticamente desactivados en cuanto el control eléctrico cambia de grupo. Así mismo no se consideran fines de carrera para los mismos, excepto para los temporizadores cuya salida puede ser asignada a los siguientes elementos a través de una memoria (en este caso T1). La tabla 2 muestra el desarrollo de la tabla de trabajo y la relación de conexiones que formaran el esquema del control eléctrico en ladder.

**Tabla 2. Tabla de trabajo generada de la secuencia de la figura 21 para aplicación de los métodos paso a paso y cascada.**

Secuencia	Grupo	Señal en el Distribuidor	Fin de Carrera
A+ M-	I	A+ → A1	-----
T+		T+ → T1	-----
A- T-	II	A- → A0	-----
B+		B+ → B1	-----
C+		C+ → C1	-----
C- V+	III	C- → C0	-----
B-		B- → B0	-----
D+		D+ → D1	-----
D- V- M+	IV	D- → D0	-----
		M+ → -----	-----

- Regla 6
- Regla 7
- Regla 8
- Regla 9

En la figura 22 se muestra el esquema de control eléctrico para la solución de la secuencia de la máquina de moldeo en cuestión.

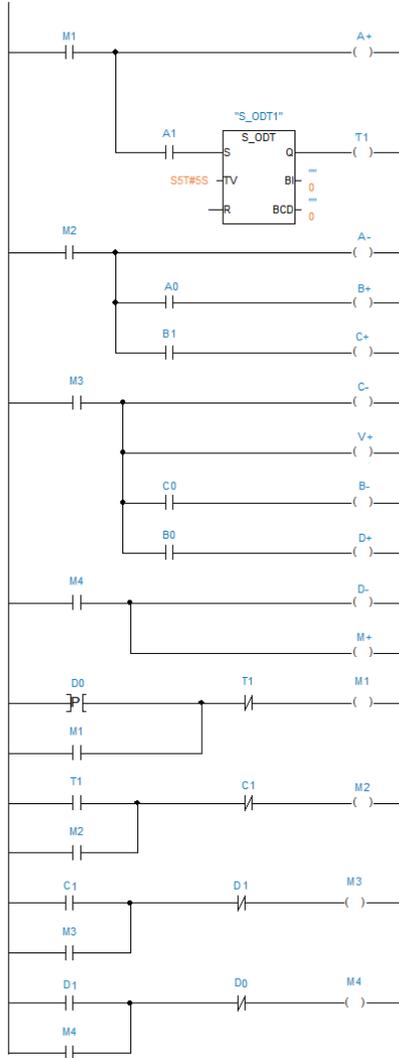


Figura 22. Solución del caso de estudio aplicando el método paso a paso.

## 5. Discusión

Los métodos basados en asignaciones lógicas siempre llevan consigo la incógnita si se generaran traslapes en las señales de activación de los distribuidores, dado que su lógica difiere cuando sus distribuidores son para actuadores de doble o simple efecto, llevando la solución a problemas de obstrucción mecánica del movimiento, sin embargo al contemplar un diagrama de estados como complemento a los diagramas espacio-fase ofrece un diseño robusto evitando los errores de diseño y forma de actuar del software de un PLC convencional.

Los métodos basados en la asignación de memorias por etapas como los son los métodos paso a paso y cascada ofrecen una solución sencilla y sistemática para la solución de cualquier secuencia, sin embargo conforme la secuencia es más larga, un programa ladder se extiende enormemente llevándonos a posibles problemas de insuficiencia de memoria en los PLC. Sin embargo, ofrecen la enorme ventaja de poderse aplicar tanto para actuadores que requieran un impulso para su activación como los que requieran señales remanentes, dado que su estructura de grupos separa señales de activación y desactivación en el método de agrupamiento, por lo que el método no cambia.



Cabe mencionar que aunque los métodos paso a paso y cascada son similares, conforme la dificultad de la secuencia va incrementando existen ocasiones en las cuáles no se cumple la condición necesaria para la activación del primer grupo de trabajo, obligando al método paso a paso al uso de un arranque manual a través de un pulsador, a diferencia del cascada, el cual cuenta con una activación de la secuencia de un grupo a través de un contacto normalmente cerrado obligando al sistema a iniciar en un grupo determinado.

Además de los métodos analíticos para el control de secuencias, los PLC ofrecen innumerables herramientas de solución, como lo es la aplicación de generadores de impulso, temporizadores, detección de flancos, contadores y comparadores, que independientemente de ellos es vital el conocimiento de su funcionamiento y la forma en que el PLC procesa la información para combinarlos y dar solución a una problemática industrial.

## 6. Conclusiones

Para la solución de un automatismo es muy importante la representación de movimientos en una secuencia, además del estudio previo del comportamiento de sus sensores y actuadores, esto aunado con la comprensión de los métodos analíticos o sistemáticos nos pueden ofrecer una alta gama de soluciones tanto para problemas neumáticos como electroneumáticos y automatismos usando PLC.

Dependiendo de los alcances y prestaciones del PLC usado se puede elegir la estrategia de control eléctrico más adecuada, sin embargo es muy importante la comprensión y fundamentación lógica de un procedimiento para hacer que nuestros diseños sean directamente implementables en campo y evitar problemas de acondicionamiento de los programas de PLC dada una obstrucción mecánica no contemplada en la etapa de diseño.

## Referencias

- [1] Martín J., García M. "Automatismos Industriales", Editex, España, 2009.
- [2] Millan S. "Automatización neumática y electroneumática", Norgren Biblioteca Técnica, 1995.
- [3] Mendoza J., Muriel J., Medina F. "Aplicación del Método Paso a Paso en las Solución de Problemas de Electroneumática", Scientia Et Technica, vol. XVII, núm. 47, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2011.
- [4] Soria S. "Sistemas Automáticos Industriales de Eventos Discretos", Alfaomega, México, 2013.
- [5] Yuste R., Martines L. "Programación del Automata S7-300 Instrucciones básicas", Edcai, 2005.
- [6] [http://wikifab.dimf.etsii.upm.es/wikifab/index.php/Grupo\\_13\\_\(1463\):\\_%22Unloading%22](http://wikifab.dimf.etsii.upm.es/wikifab/index.php/Grupo_13_(1463):_%22Unloading%22)





# Enfoque de control adaptable basado en optimización meta-heurística para un motor de CD

Rodríguez-Molina Alejandro, Villarreal-Cervantes Miguel Gabriel, Aldape-Pérez Mario

Departamento de Posgrado, LGAC de Mecatrónica,  
Instituto Politécnico Nacional, CIDETEC, Av. Juan de Dios Bátiz s/n, 07700, CDMX, México.

## Resumen

*En el presente trabajo se proponen dos estrategias de control adaptable para la tarea de regulación de velocidad de un motor de CD sujeto a incertidumbres paramétricas. Las estrategias se basan en la formulación de dos problemas de optimización distintos que se solucionan en línea utilizando algoritmos meta-heurísticos. La solución de cada problema de optimización, obtenida para cada instante de muestreo, incluye a los mejores parámetros del motor de CD, los cuales, son utilizados en el cálculo de la señal de control. Los resultados obtenidos en simulación se comparan contra dos controladores clásicos para verificar el funcionamiento de las estrategias propuestas y se exponen sus posibles ventajas.*

**Palabras clave:** Control adaptable, meta-heurística, optimización dinámica, motor de CD, regulación de velocidad.

## 1. Introducción

El motor de CD es el elemento principal de muchas aplicaciones en ingeniería que requieren actuación. El uso de un motor de CD tiene distintas ventajas, entre las cuales se encuentran: su simpleza de operación al variar su voltaje de entrada, su bajo costo y la existencia de una gran diversidad de diseños que se ajustan a cualquier prototipo.

Para que una aplicación que hace uso de este elemento funcione de manera adecuada, el sistema de control debe garantizar un funcionamiento preciso del mismo en las tareas de regulación y/o seguimiento.

Existen diversos sistemas de control que son capaces de proveer un comportamiento adecuado del motor de CD para dichas tareas. El controlador PI por ejemplo, es uno de los controladores más utilizados en la industria para la tarea de regulación de velocidad debido a su alto rendimiento y fácil implementación [1].

Sin embargo, el rendimiento de muchos sistemas de control se ve comprometido ante la presencia de incertidumbres paramétricas. Estas incertidumbres, son variaciones en los parámetros físicos del motor de CD, las cuales, son normalmente impredecibles y dificultan el control. Usualmente, las incertidumbres se producen a causa de cambios en el entorno de operación, como consecuencia del desgaste del mismo motor después de su uso ininterrumpido o debido a dinámicas no modeladas.

El control adaptable es el nombre que se le da a una clase de control que busca contrarrestar el efecto negativo de las incertidumbres paramétricas. En esta clase, los parámetros de control (ganancias o parámetros físicos de la planta) se estiman en línea utilizando la retroalimentación del sistema [2]. Los parámetros obtenidos, son utilizados en el cálculo de la señal de control que modera el comportamiento del sistema y permite su adecuada operación.



El control adaptable ha sido estudiado desde diferentes enfoques. En el enfoque clásico se han desarrollado a lo largo del tiempo diferentes leyes de control adaptativas basadas en estabilidad o sensibilidad [3]. Estas leyes de control buscan la convergencia de un conjunto de parámetros de control estimados hacia un conjunto de parámetros reales de un sistema dinámico después de un periodo de tiempo determinado. Estos parámetros permiten el control adecuado de dicho sistema ante la presencia de incertidumbres.

De manera general para el enfoque clásico de control adaptable, la convergencia eficaz de los parámetros estimados a los reales se logra cuando las incertidumbres varían lentamente y de forma no abrupta [4].

Además del enfoque clásico, el control adaptable se ha desarrollado mediante la aplicación de técnicas de inteligencia artificial, entre las cuales destacan el uso de redes neuronales [5] y lógica difusa [6]. Aunque han demostrado ser eficaces, la mayoría de las técnicas de inteligencia artificial utilizadas para el control de sistemas dinámicos requieren de conocimiento a priori de las señales de entrada y salida de dichos sistemas para ser entrenadas o ajustadas fuera de línea, y en muchos casos no es posible contar con esta información, o en algunos otros, la información utilizada puede ser poco confiable debido a la naturaleza impredecible de las incertidumbres paramétricas.

Un enfoque adicional a los ya mencionados, basa su funcionamiento en el uso de técnicas de optimización meta-heurísticas, las cuales, son capaces de encontrar soluciones adecuadas en un tiempo computacional razonable [7]. Dichas técnicas, son utilizadas para solucionar en línea un problema de optimización y las soluciones obtenidas contienen a los mejores parámetros de control.

Aunque no existe suficiente desarrollo bajo este enfoque, pueden encontrarse trabajos como en [8], en donde se realiza la sintonización óptima de un controlador IP en línea usando un algoritmo genético (AG). El controlador IP optimizado, es utilizado en el control de posición de un motor de inducción lineal. El principal problema de la propuesta anterior se relaciona con el uso de un controlador lineal, para el cual, la adaptación del sistema de control se dificulta cuando las incertidumbres varían rápidamente. Por su parte, en [9] se presenta una estrategia de control adaptable basada en optimización meta-heurística. En dicha estrategia, los parámetros óptimos de un motor de CD se obtienen en línea mediante la solución de un problema de optimización multi-objetivo y son utilizados en el cálculo de la señal de control adecuada; sin embargo, la complejidad computacional del problema que se plante, limita la posibilidad de llevar esta propuesta a un entorno real.

En este trabajo, se presentan dos estrategias de control adaptable basadas en el enfoque de optimización meta-heurística para la regulación de velocidad de un motor de CD. Para cada estrategia, se plantea un problema de optimización diferente. La solución a cada problema se obtiene en línea con la ayuda de técnicas de optimización meta-heurísticas. Cada solución obtenida incluye a un conjunto óptimo de parámetros del motor, los cuales, son utilizados por un controlador por dinámica inversa en el cálculo de la señal de control. La eficacia de las estrategias que aquí se proponen es estudiada en simulación y se compara con dos enfoques clásicos de control. Además, se verifica que las propuestas son capaces de compensar incertidumbres que varían rápidamente y se evalúa la posibilidad de implementarlas en un entorno experimental.

## 2. Modelo dinámico del motor de CD

El modelo dinámico del motor de CD mostrado en la figura 1, se describe por las ecuaciones (1) y (2), en donde  $q$ ,  $\dot{q}$ ,  $\ddot{q}$ , son el ángulo, la velocidad angular y la aceleración angular de la flecha,  $i_a$  es la corriente de armadura,  $J_0$  es el momento de inercia del rotor,  $k_m$  es la constante de torque,  $b_0$  es la constante de fricción viscosa,  $\tau_L$  es el par de carga,  $R_a$  es la resistencia de armadura,  $L_a$  es la inductancia de armadura,  $k_e$  es la constante de fuerza electromotriz y  $u$  es el voltaje de entrada.

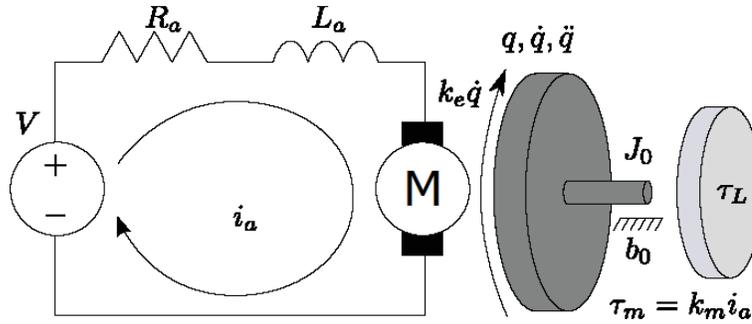


Figura 1. Diagrama electro-mecánico del motor de CD.

$$L_a \frac{di}{dt} + R_a i_a + k_e \dot{q} = u \quad (1)$$

$$J_0 \ddot{q} + b_0 \dot{q} = k_m \left( i - \frac{\tau_L}{k_m} \right) \quad (2)$$

El modelo dinámico del motor, es utilizado como modelo de referencia para encontrar los parámetros adecuados del motor de CD.

### 3. Estrategias de control adaptable

La estructura general de las dos estrategias de control adaptable que se proponen en este trabajo se muestra en la figura 2. El propósito de cada estrategia es el de reducir el error en la tarea de regulación de velocidad del motor de CD. Para ello, se plantea un problema de optimización dinámico. La solución a este problema, consiste en el conjunto de parámetros  $\bar{p}$  que minimiza el error entre los estados reales  $x$  (adquiridos desde el motor de CD) y los estados estimados  $\bar{x}$  (obtenidos con el modelo dinámico estimado). El conjunto óptimo de parámetros  $\bar{p}$  se obtiene mediante el uso de técnicas meta-heurísticas y es utilizado en el cálculo de la señal de control  $u$  para cada instante de muestreo  $\Delta t$ . Cabe mencionar que la diferencia principal entre las dos estrategias de control que se proponen se observa en el planteamiento de dos problemas de optimización distintos que se exponen a continuación.

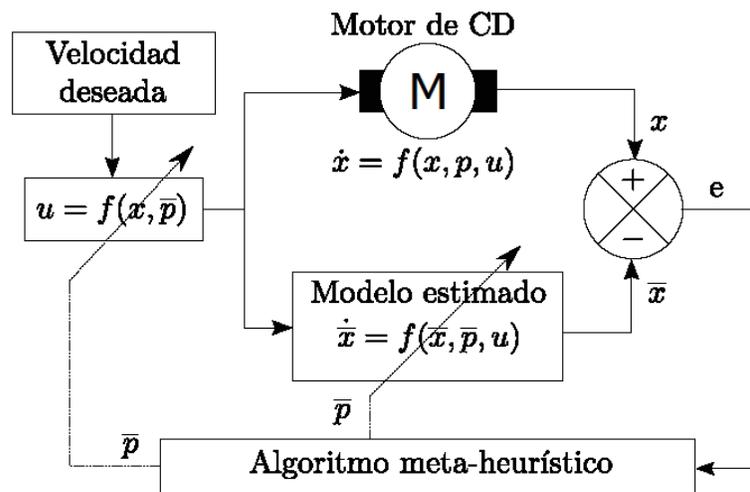


Figura 2. Estrategia de control propuesta.



### 3.1 Primer problema

Para el primer problema de optimización, el modelo dinámico del motor se escribe como  $\dot{x} = f(p, x, u)$  con  $x = [q, \dot{q}, i_a]^T$  el vector de estados y  $p = [p_1, \dots, p_6]^T = \left[ \frac{b_0}{J_0}, \frac{k_m}{J_0}, \frac{k_e}{L_a}, \frac{R_a}{L_a}, \frac{1}{L_a}, \frac{\tau_L}{J_0} \right]^T$  el vector de parámetros del motor de CD. La finalidad de este problema de optimización es el de encontrar un vector  $\bar{p}$  que minimice el valor de la función objetivo en (3). La función en (3), pondera equitativamente el error entre los estados reales  $x$  y los estimados  $\bar{x}$  dentro de un intervalo de tiempo  $\Omega \in [t_{opt} - \Delta w, t_{opt}]$ , donde  $t_{opt}$  es el instante de tiempo en el que inicia el proceso de optimización y  $\Delta w$  es el intervalo de tiempo en donde los estados pasados del motor (anteriores a  $t_{opt}$ ), son considerados en el cálculo del error.

$$\min_{\bar{p} \in R^6} J = \sum_{k=1}^3 \left[ \int_{t \in \Omega} (x_k(p, t) + \bar{x}_k(\bar{p}, t))^2 dt \right] \quad (3)$$

Para regular la velocidad del motor de CD, se utiliza el controlador por dinámica inversa en (4), en donde  $v = k_p e - k_d \dot{q}$  con  $k_p$  y  $k_d$  las ganancias proporcional y derivativa,  $e = \omega_r - \dot{q}$  y  $\omega_r$  la velocidad deseada.

$$u = \frac{1}{\bar{p}_5 \bar{p}_2} (v + \bar{p}_1 (\bar{p}_2 i_a - \bar{p}_1 \dot{q} - \bar{p}_6)) + \frac{\bar{p}_3}{\bar{p}_5} \dot{q} + \frac{\bar{p}_4}{\bar{p}_5} i_a \quad (4)$$

### 3.2 Segundo problema

Una de las principales desventajas de los sistemas de control en lazo cerrado, es la necesidad de incluir elementos de censado que suelen ser muy costosos. Por esta razón, se propone un segundo problema de optimización, el cual considera el espacio de estados  $z = [z_1, z_2]^T = [\dot{q}, \ddot{q}]^T$  y  $\tau_L = 0$ . Entonces el modelo dinámico del motor se escribe como en (5), en donde  $\theta_0 = k_e + \frac{R_a b_0}{k_m}$ ,  $\theta_1 = \frac{J_0 R_a}{k_m} + \frac{L_a b_0}{k_m}$  y  $\theta_2 = \frac{J_0 L_a}{k_m}$ , y el controlador por dinámica inversa puede escribirse como en (6).

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} z_2 \\ \frac{1}{\theta_2} u - \frac{\theta_0}{\theta_2} z_1 - \frac{\theta_1}{\theta_2} z_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$u = \bar{\theta}_2 v + \bar{\theta}_0 z_1 + \bar{\theta}_1 z_2 \quad (6)$$

Con las consideraciones anteriores, la función objetivo para este problema se muestra en (7). De forma análoga al primer problema, la función en (7) utiliza los estados anteriores al inicio del proceso de optimización para el cálculo del error.

$$\min_{\bar{\theta} \in R^3} J = \sum_{k=1}^2 \left[ \int_{t \in \Omega} (z_k(\theta, t) + \bar{z}_k(\bar{\theta}, t))^2 dt \right] \quad (7)$$

### 3.3 Restricciones

Los dos problemas de optimización utilizados se encuentran restringidos por la dinámica del motor real y estimado, por las condiciones iniciales de las variables de estado en (8) y en (9), y por los límites inferior y superior de la señal de control en (10).

$$\bar{x}(\bar{p}, t_{opt} - \Delta w) = x(p, t_{opt} - \Delta w), \quad x(0) = x_0 \quad (8)$$

$$\bar{z}(\bar{\theta}, t_{opt} - \Delta w) = z(\theta, t_{opt} - \Delta w), \quad z(0) = z_0 \quad (9)$$

$$u_{min} \leq u(t_{opt}) \leq u_{max} \quad (10)$$



## 4. Técnicas de optimización meta-heurísticas

Las técnicas de optimización meta-heurísticas, otorgan soluciones adecuadas a problemas de optimización complejos en un tiempo computacional asequible, además de no requerir condiciones especiales en el problema como diferenciabilidad, lo cual las ha vuelto populares en distintas áreas de investigación en los últimos años.

El teorema de "No free lunch" establece que no existe una meta-heurística capaz de resolver cualquier problema, por lo que para dos problemas distintos, es muy probable que una sola meta-heurística no funcione igualmente bien para ambos [10].

Para demostrar el funcionamiento de las estrategias de control propuestas se utilizan dos algoritmos meta-heurísticos. El primer problema de optimización se resuelve utilizando el algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO por sus siglas en inglés) y el segundo mediante el algoritmo de evolución diferencial (DE por sus siglas en inglés). Cabe mencionar que las técnicas que se utilizan en este trabajo, fueron seleccionadas después de realizar comparaciones con base en un estudio de estadística convencional y no paramétrica contra distintas meta-heurísticas para cada una de las estrategias propuestas, siendo PSO y DE las mejores opciones para el primer y segundo problema respectivamente.

### 4.1 Optimización por enjambre de partículas

El algoritmo de optimización por enjambre de partículas emula el comportamiento colaborativo de muchas especies en la búsqueda de alimento [11]. El algoritmo 1 muestra el funcionamiento básico de PSO para búsqueda global, en donde las partículas de un enjambre se mueven durante  $G_{max}$  generaciones por el espacio de búsqueda. En cada generación, las partículas modifican su velocidad usando (11), en donde  $C_1$  y  $C_2$  son factores que ponderan el conocimiento de la mejor posición conocida por una partícula y por el enjambre, con  $\beta_1, \beta_2 \in [0,1]$  factores aleatorios y  $\omega$  un factor que reduce linealmente la velocidad de todas las partículas con el paso de las generaciones y es obtenido con (12) dentro del intervalo  $[V_{min}, V_{max}]$ . Usando su velocidad, cada partícula modifica su posición usando (13) y al final del algoritmo, las partículas se encuentran en las mejores posiciones.

$$\dot{x}_i = \omega \dot{x}_i + \beta_1 C_1 (x_i^{best} - x_i) + \beta_2 C_2 (x_{swarm}^{best} - x_i) \quad (11)$$

$$\omega = V_{max} - \frac{G}{G_{max}} (V_{max} - V_{min}) \quad (12)$$

$$x_i = x_i + \dot{x}_i \quad (13)$$

### 4.2 Evolución diferencial

El algoritmo de evolución diferencial está inspirado en el proceso de evolución natural [12]. El algoritmo 2 muestra el funcionamiento de la variante *DE/best/1/exp*. En esta variante se genera una población inicial de forma aleatoria en el espacio de búsqueda. Durante  $G_{max}$  generaciones, los individuos en la población mutan de acuerdo con (14), en donde  $F$  es la probabilidad de mutación, y se recombinan usando (15), en donde  $CR$  es la probabilidad de recombinación,  $j_{rand}$  es un índice aleatorio y  $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$  son los índices de los padres ( $r_1$  es el índice del mejor individuo de la generación y  $r_2, r_3$  son índices obtenidos aleatoriamente). Al final de cada generación, se seleccionan los mejores individuos como indica (16). En la última generación se encuentran los mejores individuos.

$$v_i = x_{r_1} + F(x_{r_2} - x_{r_3}) \quad (14)$$

$$u_{i,j} = \begin{cases} v_{i,j}, & \text{para } \beta \leq CR \text{ ó } j = j_{rand} \\ x_{i,j}, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (15)$$



$$x_i = \begin{cases} u_i, & \text{si } f(u_i) \leq f(x_i) \\ x_i, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (16)$$

<b>Algoritmo 1 Optimización por Enjambre de Partículas</b>	
1:	Genera un enjambre inicial $X_0$ con las posiciones de $NP$ partículas
2:	Evalúa el enjambre $X_0$ (valor de la función objetivo y número de restricciones violadas)
3:	Para cada partícula $x_i$ inicializa su mejor posición conocida $x_i^{best}$
4:	Inicializa la mejor posición conocida por el enjambre $x_{swarm}^{best}$
5:	Inicializa la velocidad de cada partícula
6:	$G \leftarrow 0$
7:	<b>while</b> $G \leq G_{max}$ <b>do</b>
8:	Actualiza el factor de velocidad $\omega$ (ver (12))
9:	<b>for each</b> $x_i \in X_G$ <b>do</b>
10:	Actualiza su velocidad $\dot{x}_i$ (ver (11))
11:	Actualiza su posición $x_i$ (ver(13))
12:	Si la nueva posición es mejor, actualiza su mejor posición conocida $x_i^{best}$
13:	<b>end for</b>
14:	Actualiza la mejor posición conocida por el enjambre $x_{swarm}^{best}$
15:	$G \leftarrow G + 1$
16:	<b>end while</b>

**Algoritmo 1. Optimización por Enjambre de Partículas.**

<b>Algoritmo 2 Evolución Diferencial (DE/best/1/exp)</b>	
1:	Genera una población inicial con $X_0$ individuos
2:	Evalúa la población $X_0$ (valor de la función objetivo y número de restricciones violadas)
3:	$G \leftarrow 0$
4:	<b>while</b> $G \leq G_{max}$ <b>do</b>
5:	<b>for each</b> $x_i \in X_G$ <b>do</b>
6:	Genera individuo mutante $v_i$ (ver (14))
7:	Genera individuo hijo $u_i$ (ver (15))
8:	<b>end for</b>
9:	Selecciona a los individuos de la siguiente generación $G + 1$ (ver (16))
10:	$G \leftarrow G + 1$
11:	<b>end while</b>

**Algoritmo 2. Evolución diferencial.**

### 4.3 Manejo de restricciones

Para solucionar un problema de optimización restringido, un algoritmo meta-heurístico debe incluir un mecanismo de manejo de restricciones. El criterio de Deb, es un mecanismo que permite decidir si una solución es mejor que otra con base en la cantidad de restricciones que viola cada una [13]. El criterio de Deb establece lo siguiente:



- Cualquier solución factible es preferida a una no factible.
- Entre dos soluciones factibles, se prefiere a la que tiene un mejor valor de la función objetivo.
- Entre dos soluciones no factibles, se prefiere a la que tiene una menor cantidad de restricciones violadas.

Adicionalmente al criterio de Deb, si dos soluciones no factibles violan la misma cantidad de restricciones, se elige una de forma aleatoria con la misma probabilidad.

## 5. Resultados en simulación

Para comprobar el funcionamiento de las estrategias propuestas, se busca regular en simulación la velocidad del motor de CD a  $\omega_r = 52.35 \frac{rad}{s}$  durante 3 s, utilizando  $\Delta t = 5 ms$  y  $\Delta w = 50 ms$ . Para esto, los parámetros del motor varían de forma sinusoidal hasta en 10% de su valor nominal como se muestra en la tabla 1. Adicionalmente, se utiliza un par de carga de  $\tau_L = 0.05 Nm$  en el intervalo  $t \in [1,2]$  s y de  $\tau_L = 0 Nm$  en cualquier otro caso.

Tabla 1. Parámetros del motor de CD.

Valor nominal	Valor dinámico
$R_a = 9.665 \Omega$	$R_a(t) = R_a + 0.1R_a \sin\left(\frac{2\pi}{3}t\right)$
$L_a = 102.44 \times 10^{-3} H$	$L_a(t) = L_a + 0.1L_a \sin(\pi t)$
$k_m = 0.3946 Nm$	$k_m(t) = k_m + 0.1k_m \sin(2\pi t)$
$k_e = 0.4133 v/rad$	$k_e(t) = k_e + 0.1k_e \sin(2\pi t)$
$b_0 = 5.85 \times 10^{-4} Nms$	$b_0(t) = b_0 + 0.1b_0 \sin(\pi t)$
$J_0 = 3.45 \times 10^{-4} Nms^2$	$J_0(t) = J_0 + 0.1J_0 \sin\left(\frac{2\pi}{3}t\right)$

Cada estrategia de control se ejecuta 100 veces de forma independiente. El criterio de paro para ambos algoritmos se establece en 1500 evaluaciones de la función objetivo, en otras palabras, el tamaño del enjambre y de la población para PSO y DE respectivamente se establecen en  $NP = 25$ , y el número máximo de generaciones en  $G_{max} = 50$ , lo anterior con el fin de alcanzar una solución adecuada al problema de optimización en un tiempo menor a  $\Delta t = 5 ms$ .

Los parámetros de PSO y DE se ajustan con ayuda del paquete *i-race* del software de análisis estadístico *R*. Para esto, cada algoritmo se prueba de forma iterativa con diferentes configuraciones de sus parámetros durante 5000 ejecuciones y *i-race* se encarga de decidir con base en un análisis estadístico no paramétrico, cual es la mejor configuración.

Adicionalmente, el rendimiento de la estrategia propuesta se compara contra dos controladores deterministas clásicos: el MRAC y el PI.

El desarrollo en simulación se realizó en lenguaje C++ sobre una PC con procesador *i5* a 3.5 GHz y 16 GB de RAM.



### 5.1 Discusión

Para el experimento propuesto, las estrategias de control que utilizan el primer y el segundo problema de optimización (nombradas como PO1-PSO y PO2-DE respectivamente), se ejecutan 100 veces de forma independiente. La tabla 2 contiene los resultados obtenidos tras la simulación de cada estrategia. En la misma se muestran la norma del error para la mejor ejecución  $\|e\|_{best}$  para la peor ejecución  $\|e\|_{worst}$  y para el caso promedio  $\overline{\|e\|}$ , calculadas a partir de  $t \geq \Delta w$ . Junto con las normas del error mencionadas, se muestran sus respectivos valores de consumo energético representados por la normas de la señal de control  $\|u\|_{best}$ ,  $\|u\|_{worst}$  y  $\|u\|$ . Además, se incluye el valor de la desviación estándar de la norma del error en  $std(\|e\|)$  y el tiempo promedio de convergencia de un proceso de optimización en  $t_{exec}/n$ .

Analizando la tabla 2, se puede observar que la estrategia que utiliza el segundo problema de optimización PO2-DE, es más efectiva que PO1-PSO en la tarea de regulación de velocidad del motor de CD, además de presentar un menor consumo energético. Por su parte el valor de  $std(\|e\|)$ , indica que el funcionamiento de ambas estrategias es confiable, ya que el valor del error en regulación no presenta cambios considerables. El comportamiento de las mejores ejecuciones de ambas estrategias se muestra en las Figura 3.

Es importante resaltar que para el hardware utilizado, el tiempo de convergencia  $\overline{t_{exec}/n}$ , es menor al tiempo de muestreo de 5 ms en ambas estrategias, por lo que una implementación experimental es factible.

Las estrategias propuestas se comparan además con dos controladores clásicos: un controlador PI y un controlador adaptable por modelo de referencia (MRAC por sus siglas en inglés). La tabla 3 muestra las normas del error  $\|e\|$  y de la señal de control  $\|u\|$  obtenidas para estos dos controladores. Como puede observarse, estos valores son mucho más grandes que el valor de  $\|e\|_{worst}$  de la tabla 2, lo cual es un indicador de que las estrategias propuestas presentan una mayor precisión en la regulación de velocidad del motor de CD que los controladores clásicos utilizados cuando existen incertidumbres paramétricas. En cuanto al consumo energético, el controlador MRAC presenta mayor eficiencia; sin embargo, el bajo consumo en este caso, está relacionado con una estabilización lenta y en consecuencia una acumulación mayor del error. Adicionalmente, en la Figura 3, se puede apreciar el comportamiento de ambos controladores clásicos.

**Tabla 2. Resultados obtenidos usando las estrategias PO1-PSO y PO2-DE en la regulación de velocidad del motor de CD.**

Caso	$\ e\ _{best}$	$\ e\ _{worst}$	$\overline{\ e\ }$	$std(\ e\ )$	$\ u\ _{best}$	$\ u\ _{worst}$	$\ u\ $	$\overline{t_{exec}/n}$
PO1-PSO	12.579	21.209	14.861	1.899	556.926	559.276	557.874	1.910
PO2-DE	<b>5.502</b>	<b>8.601</b>	<b>6.832</b>	<b>0.872</b>	<b>556.007</b>	<b>555.570</b>	<b>555.961</b>	<b>1.153</b>

**Tabla 3. Resultados obtenidos usando los controladores MRAC y PI en la regulación de velocidad del motor de CD.**

Controlador	$\ e\ $	$\ u\ $
MRAC	514.445	447.582
PI	55.139	551.758

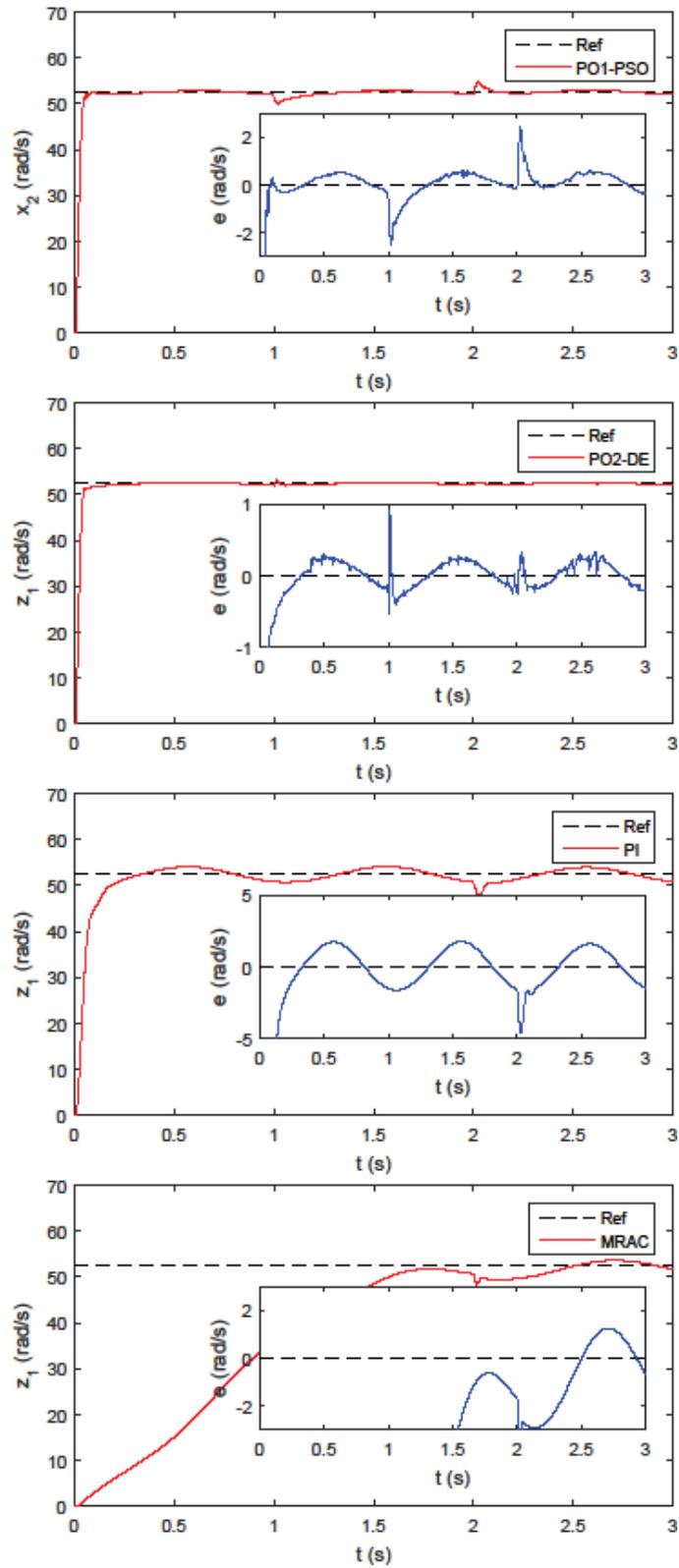


Figura 3. Comportamiento de las mejores ejecuciones de la estrategia de control propuesta para PO1-PSO y PO2-DE, y de los controladores PI y MRAC.



## 6. Conclusiones

En este trabajo se muestra la eficacia del enfoque de control adaptable basado en el uso de técnicas meta-heurísticas.

Las dos estrategias de control propuestas demostraron su capacidad para regular la velocidad de un motor de forma precisa, incluso en presencia de incertidumbres paramétricas que varían rápidamente. Sin embargo, PO2-DE mostró tener un rendimiento superior al compararse con PO1-PSO. Esta diferencia puede explicarse si se observa la forma de los problemas de optimización utilizados por cada estrategia. La dimensión del espacio de búsqueda para el primer problema es mayor que la del segundo, en este caso, resulta más sencillo para una técnica meta-heurística encontrar soluciones adecuadas en un espacio de menor tamaño cuando el número de evaluaciones de la función objetivo se limita.

Se logró comprobar que las dos estrategias propuestas presentan cierta tolerancia al incluir un par de carga en simulación, aun cuando en el problema de optimización de la segunda estrategia este parámetro no fue considerado. Esto debido a la libertad que tiene la técnica meta-heurística para encontrar valores de los parámetros del motor de CD que compensan esta incertidumbre.

Adicionalmente, la complejidad computacional de las estrategias propuestas no representa un impedimento para su implementación experimental ya que el tiempo requerido para obtener un conjunto de parámetros de control adecuado no rebasa el tiempo de muestreo propuesto.

Al comparar los resultados de las estrategias de control adaptable meta-heurísticas contra dos controladores deterministas clásicos como el PI y el MRAC, se observó una diferencia favorable para las propuestas en este trabajo.

Como actividades a futuro se contempla la prueba experimental de las estrategias de control aquí descritas.

## Referencias

- [1] Chen T. C., Sheu, T. T. “*Model reference neural network controller for induction motor speed control*”, Transactions on Energy Conversion, IEEE, vol. 2, no. 17, pp. 157-163, 2002.
- [2] Landau I., Lozano R., and M'Saad M. “*Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications*”, Springer Science+Business Media, USA, 1era edición, 2011.
- [3] Mo J. S., Qiu Z. C., Wei J. Y., Zhang X. M. “*Adaptive positioning control of an ultrasonic linear motor system*”, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Elsevier, vol. 44, no. 1, pp. 156-173, 2017.
- [4] Hespanha J. P., Liberzon D., Morse A. “*Overcoming the limitations of adaptive control by means of logic-based switching*”, Systems & Control Letters, Elsevier, vol. 1, no. 49, pp. 49-65, 2003.
- [5] Xiaoxiong L., Liyuan S., Kang C., Wei G. “*A neural network-based direct adaptive fault tolerance light control for control surface damage*”, Procedia Engineering, Elsevier, vol. 15, no. 1, pp. 147-151, 2011.
- [6] Ramadan E., El-bardini M., Fkirin M. “*Design and FPGA-implementation of an improved adaptive fuzzy logic controller for DC motor speed control*”, Ain Shams Engineering Journal, Elsevier, vol. 5, no. 3, pp. 803-816, 2014.
- [7] Reeves C. R. “*Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*”, John Wiley & Sons, USA, 1era edición, 1993.
- [8] Lin F. J., Shieh H. J., Shyu K. K., Huang P. K. “*On-line gain-tuning IP controller using real-coded genetic algorithm*”, Electric Power Systems Research, Elsevier, vol. 72, no. 2, pp. 157-169, 2004.
- [9] Villarreal-Cervantes M.G., Mezura-Montes E. “*Control adaptable basado en evolución diferencial para un motor de CD*”, Congreso Nacional de Control Automático, AMCA, pp. 42-47, México, 2013.
- [10] Wolpert D. H., Macready W. G. “*No free lunch theorems for optimization*”, Transactions on evolutionary computation, IEEE, vol. 1, no. 1, pp. 67-82, 1997.



- [11] Kennedy J. and Eberhart R. *"Particle swarm optimization"*, International Conference on Neural Networks, IEEE, pp. 1942-1948, Australia, 1995.
- [12] Price K., Storn R. M., Lampinen, J. A. *"Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization (Natural Computing Series)"*, Springer-Verlag, USA, 1era edición, 2005.
- [13] Deb K. *"An efficient constraint handling method for genetic algorithms"*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Elsevier, vol. 186, no. 2-4, pp. 311-338, 2000.





# Algoritmo para obtención de Índice de desempeño, en configuraciones de robots SCARA, Cartesiano y Antropomórfico.

Cortes Berruecos Rene<sup>1</sup>, Torres Méndez Sergio Javier<sup>1</sup>, Muñoz Hernández German Ardul<sup>1</sup>, Reyes Cortes Fernando<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional De México, Instituto Tecnológico de Puebla  
Av. Tecnológico 420 Col. Maravillas, Puebla Puebla. México. C.P. 72220.  
rene.cb@gmail.com, serm7007@yahoo.com.mx, gmunoz64@yahoo.co.uk.

<sup>2</sup> Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 4 sur, 104, Col. Centro, C.P. 72000, San Manuel Puebla, Puebla. México; recf62@gmail.com

## Resumen

*Se realizará el estudio de los índices de desempeño en un robot planar vertical de dos GDL, en un robot SCARA usando solo hombro y codo en forma horizontal, y un robot cartesiano solo usando los ejes X y Y.*

*Se desarrollará un algoritmo de control para cada estructura robótica, integrando funciones que contengan los modelos matemáticos de la cinemática directa, cinemática inversa, modelo dinámico, la energía y control aplicada al robot, de esta forma crear un programa principal que nos resuelva el modelo dinámico y muestre las trayectorias y valores de errores de posiciones deseadas de cada eslabón.*

*A partir de la norma  $L_2$  se verificara su índice de desempeño, dependiendo de todas las variables que intervienen en cada estructura robótica, todas las simulaciones se desarrollaran en el editor de Matlab para validar nuestros resultados.*

**Palabras clave:** Índice de desempeño, algoritmo, Matlab.

## 1. Introducción

En el presente artículo se desarrollaran herramientas para la investigación en el área de robótica, que sirva de apoyo a investigadores y estudiantes que pretenden conocer más acerca de los fenómenos físicos que están presentes en estructuras mecánicas de más de dos eslabones acopladas entre sí, sin la necesidad de construir un robot físicamente, con la ayuda del programa Matlab, será posible simular los movimientos y trayectorias programadas por el usuario, será indispensable incluir en los algoritmos las variables necesarias dependiendo de la estructura que se quiera simular como por ejemplo, la masa y distancia de los eslabones, el espesor de los servomotores, la gravedad. Se necesitara tener el modelo dinámico dentro del algoritmo y resolverlo con la función ODE45 para que nos regrese la función lineal de modelo dinámico y el programa entienda de que estructura se está trabajando, la cinemática directa e inversa son de suma importancia ya que estas son necesarias para poder realizar la trayectoria programada, el usuario es libre de usar el control que más le convenga para aplicar la fuerza a cada uno de los servomotores y realizar el movimiento de los eslabones, en esta investigación se usara el control PD, este tipo de control es aplicado en los algoritmos que aquí desarrollamos, para hacer la comparación de un índice



de desempeño se puede hacer con diferentes tipos de control, en este trabajo no se intenta conocer los diferentes tipos de control que existen, solo tenemos como tarea conocer el desempeño del robot.

Al final de los algoritmos se resuelve la ecuación de la norma  $L_2$  que nos regresa el error de la posición de la trayectoria programada, este error nos dice el desempeño que tiene el robot; ya que entre más pequeño el error es mejor el desempeño de trabajo.

Un robot es un sistema mecánico muy complejo cuya descripción analítica requiere de ecuaciones diferenciales. La naturaleza no lineal, multivariable y acoplada de su comportamiento dinámico ofrece un amplio espectro en la formulación de problemas de control teóricos y prácticos. El modelo dinámico del robot manipulador permite explicar todos los fenómenos físicos que se encuentran en su estructura mecánica tales como efectos inerciales, fuerzas centrípetas y de coriolis, par gravitacional y fricción la cual son fenómenos físicos intrínsecos o propios de la naturaleza dinámica del robot. Estos fenómenos aparecen en el rango de operación nominal o ancho de banda del robot. Bajo determinadas condiciones, algunas configuraciones mecánicas de robots manipuladores pueden exhibir dinámica caótica, lo cual es un fenómeno dinámico no lineal adicional a los ya citados. La mecánica analítica representa la herramienta sólida de ciencias exactas para formular modelos matemáticos de sistemas mecánicos, en este contexto, la dinámica es la parte de la física que estudia la relación que existe entre fuerzas que actúan sobre un cuerpo y el movimiento que en él se origina. Por este motivo, el análisis y estudio de los fenómenos del robot se lleva a cabo por medio de ecuaciones diferenciales no lineales para formar el modelo dinámico. A diferencia de otros métodos de modelado de la física como el de Newton o el de Hamilton, las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange representan la mejor alternativa de modelado para robots manipuladores debido a las propiedades matemáticas que se deducen de manera natural usando esa metodología. Este procedimiento facilita el análisis y diseño de algoritmos de control [2].

La utilidad del modelo dinámico de robots manipuladores es fundamental para propósitos de simulación, diseño y construcción del sistema mecánico, así como el análisis y diseño de algoritmos de control. En el área de la simulación el modelo dinámico es la parte clave debido a que puede reproducir todos los fenómenos físicos sin la necesidad de usar un robot real (realidad virtual), y esta característica resulta estratégica para evaluar algoritmos de control, técnicas de planeación de trayectorias, programación de aplicaciones industriales, etc. La simulación es el empleo del modelo dinámico para analizar y describir su comportamiento dinámico en un sistema electrónico y de ahí inferir aplicaciones. Es importante no confundir la simulación con animación, son procesos diferentes; la animación no requiere incorporar efectos dinámicos en el movimiento del robot. Generalmente son ecuaciones estáticas como la cinemática directa [3].

Otra de las ventajas que representa el modelo dinámico es su empleo para diseñar y construir robots manipuladores. Los robots industriales no se diseñan de manera empírica, existe un procedimiento científico para poder diseñar y construir un robot industrial el cual se sustenta en la dinámica del robot. Los esquemas y planos de ingeniería de los eslabones son deducidos del modelo dinámico y trasladados a un programa CAD para su maquinado mecánico. De esta forma, un robot industrial puede ser estudiado y se pueden hacer las adecuaciones pertinentes antes de llegar a la etapa de construcción física [4].

## 1.1 Índices de Desempeño.

En el área de la robótica no hay criterio estándar para medir el desempeño (performance) de un algoritmo de control Nyquist, root-locus, Bode, etc., son criterios específicos lineales los cuales no aplican a robots manipuladores debido a su naturaleza no lineal [2].



Algunos investigadores miden el desempeño del algoritmo de control por inspección visual de las gráficas del error de posición y a su juicio determinan si el desempeño es adecuado, sin embargo dicha medición es muy subjetiva y queda a interpretación del mismo [2].

Un criterio académico ampliamente aceptado en la comunidad científica de robótica para medir el desempeño de un algoritmo de control es por medio de la obtención del índice de desempeño determinado por la norma  $L_2$  [2].

El índice de desempeño de un algoritmo de control de posición de robots manipuladores se define como:

$$L_2[\tilde{q}] = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \|\tilde{q}(t)\|^2 dt} \quad (1.1)$$

Donde  $T$  representa el tiempo de simulación o experimentación.

El mejor comportamiento de desempeño del controlador corresponde a la norma  $L_2$  más pequeña, un valor alto en el índice de desempeño, representa un pobre desempeño [2].

El análisis comparativo del índice de desempeño se hace con respecto a un esquema de control de referencia. Generalmente es el control PD debido a que se conoce ampliamente. El índice de desempeño de un esquema de control se refiere a la exactitud que debe tener la respuesta del robot manipulador. Los aspectos cualitativos de la estrategia de control son factores importantes que determinan el desempeño, de particular interés son las propiedades matemáticas del gradiente de la energía de potencial artificial  $\nabla v(K_p, \tilde{q})$  que permitan exhibir un corto transitorio, sobre impulsos y vibraciones mecánicas atenuadas por la función de amortiguamiento, facilidad en la sintonía de las ganancias proporcional y derivativa, robustez frente a incertidumbre paramétrica son algunas de las cualidades del esquema de control se ven reflejadas en el desempeño del algoritmo de control y por lo tanto repercuten en la medición de su indicador. Cuando el desempeño de un algoritmo de control no es el adecuado, es necesario mejorar las propiedades matemáticas de la función de energía de potencial artificial y en el efecto de amortiguamiento [3].

Un alto desempeño de esquema de control significa que la exactitud en el error de funcionamiento debe ser idealmente cero, entonces la respuesta del robot es de calidad; es decir presenta una curva con perfil suave, picos o sobre impulsos atenuados, rápido estado transitorio, no hay vibración mecánica, ni oscilaciones. Además en el estado estacionario no debe presentar juego mecánico. Sin embargo en la práctica el error de posicionamiento no tiene un valor cero debido al ruido que presenta la señal digital de la velocidad articular, más aun así se obtiene por diferenciación numérica de la posición. Hay que tomar en cuenta que el diseño del algoritmo de control es en tiempo continuo, pero la implementación es en tiempo discreto, por lo tanto una adecuada cota superior del error de posición puede ser establecida como una diezmilésima de grado para cada articulación [3].

La evaluación comparativa de desempeño no se realiza para una referencia deseada específica  $q_d$ , esto no tendrá sentido debido a que los resultados pueden cambiar para otra selección de referencia y no hay certeza para otros posibles escenarios. Por lo tanto, es necesario realizar el análisis comparativo donde los niveles de exigencia sean muy superiores al problema de control de posición, por ejemplo sobre aplicaciones de control punto a punto. La idea principal se centra en evaluar a los algoritmos de control en el seguimiento de la trayectoria con las ganancias sintonizadas para trabajar al servo amplificador en la región lineal lejos de la zona de saturación [3].

La metodología para obtener la medición del índice de desempeño consiste en realizar una comparación experimental o simulación en una aplicación donde las exigencias al algoritmo de control sean grandes [3].

El análisis comparativo consiste en seleccionar la mejor sintonía de las ganancias, para una aplicación de control punto a punto Presentar los resultados por medio de una gráfica como la que se



muestra en la figura 1.1 donde el eje horizontal (eje de las ordenadas ) representa los controladores comparados , por ejemplo  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  y  $\tau_4$ , y el eje vertical (eje de las abscisas ) es el índice de desempeño de la norma  $L_2$  el cual se representa en porcentaje. El índice más pobre (el valor más alto) representa el 100% mientras que el índice con mayor desempeño (el valor más pequeño de la norma  $L_2$ ), Se representa con menor porcentaje [3].

En la figura 1.1 el control  $\tau_1$  tiene pobre desempeño mientras que el mejor desempeño corresponde al control  $\tau_4$  mejorando hasta en un 75% del desempeño del control  $\tau_1$  [3].



Figura 1.1 índice de desempeño comparativo entre los controladores T1, T2, T3 y T4.

## 2. Diseño de algoritmos.

En esta sección se mostraran los algoritmos implementados para cada una de las estructuras robóticas y se presentara el código fuente de cada una de las funciones que se utilizaron.

### 2.1 Diseño de algoritmo de control con índices de desempeño para robot antropomórfico de dos grados de libertad.

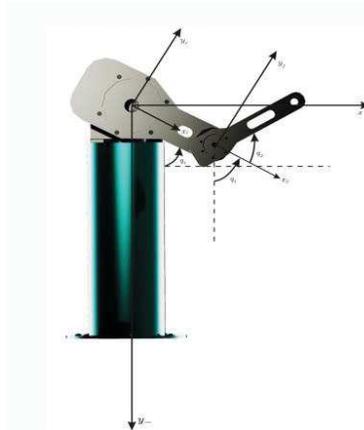


Figura 2.1: Robot antropomórfico de dos grados de libertad [3].

La tarea que se le va asignar al robot es una trayectoria con centro en (0.3,-.03) y radio de 0.20 m. los valores obtenidos serán usado para comparar el desempeño. Para la simulación del sistema, es necesario implementar tres diferentes algoritmos. El primer algoritmo del código fuente 2.1 contiene la estructura principal, la cual contiene la función ODE45 para realizar la simulación del sistema, se



obtienen los valores del error y la trayectoria de movimiento de cada eslabón, se realiza el cálculo para la obtención del índice de desempeño; para el cálculo del índice de desempeño es necesario la declaración de una variable global en nuestro caso es error la cual se vincula con otra variable del algoritmo que contiene la función del modelo dinámico.

**Código fuente 2.1** Algoritmo de control robot antropomórfico 2 gdl.

```

clc; clear all; close all;
format short g
global error
ti=0; h=0.025; tf = 10; %Periodo de muestreo
t=ti:h:tf; %vector tiempo
ci=[0; 0; 0; 0]; %Declaración de condiciones iniciales
opciones=odeset('RelTol',h*1e-3,'InitialStep', h,'MaxStep',h);
%solución numérica del modelo dinámico del robot 2gdl y control PD
[t,x]=ode45('mode_dina_robot2gdl1',t,ci,opciones);
q1=x(:,1); %Parametros de posición y velocidad
q2=x(:,2);
qp1=x(:,3);
qp2=x(:,4);
[n,m]=size(t);
yef=zeros(n,1); yef=zeros(n,1);
beta1=0.15; beta2=0.15; %Espesor de los servomotores del robot
l1=0.45; l2=0.45;
[xef,yef,~]=cinematica_r2gdl(beta1,l1,q1,beta2,l2,q2);%cinemática
DIR.
xf=.3+.20*sin(t); %Funcion para el trazado de un circulo
yf=-.3+.20*cos(t);
ebrazo=error(1,:); %Parametros de error
ecodo=error(2,:);
errorrt=ebrazo+ecodo; %Calculo de la norma 1
[m,n]=size(errorrt);
acum_error=0;
i=1;
for k=0:h:10 %Integración numerica
    acum_error=acum_error+h*(ebrazo(i)^2+ecodo(i)^2);
    i=i+1;
end
    
```

**Código fuente 2.2** Función de modelo dinámico robot antropomórfico 2gdl.

```

function xp =mode_dina_robot2gdl1(t,x)
global error
%Paso de parametros
q = [x(1);x(2)]; %vector de posición articular
qp = [x(3);x(4)];%vector de velocidad articular
%matriz de inercia M(q)
M=[2.351+0.1676*cos(q(2)),
0.102+0.0838*cos(q(2));
0.102+0.0838*cos(q(2)), 0.102];
%matriz de fuerzas centrípetas y de Coriolis
C=[-0.1676*sin(q(2))*qp(2), -
0.084*sin(q(2))*qp(2);
0.084*sin(q(2))*qp(1), 0.0];
%par gravitacional
gg=[38.46*sin(q(1))+1.82*sin(q(1)+q(2));
1.82*sin(q(1)+q(2))];
%fricción viscosa
fr=[2.288*qp(1);
0.175*qp(2)];
%Algoritmo de control
[error1,tau] = energia_control2(t,q,qp);
error=horzcat(error,error1);
%ecuación en lazo cerrado
qpp = inv(M)*(tau-C*qp-gg-fr);
%vector de salida
xp = [qp(1); qp(2); qpp(1); qpp(2)];
end
    
```

En el código fuente 2.2. contiene los valores del modelo dinámico del robot, así como también hace llamada a la función `energia_control2`, la cual contiene el controlador PD a implementar.

**Código fuente 2.3:** función de energía de control para robot antropomórfico 2 gdl.

```

function [qtil tau] = energia_control2(t,x,qp)
q=[x(1);x(2)]; %posiciones
qp=[qp(1); qp(2)]; %velocidades

%Valores de las ganancias proporcional y derivativa
kp1=7.5;
kp2=7.5;
kv1=kv1*0.5;
kv2=kv2*0.5;
kp=[kp1,0;0,kp2]; %ganancia proporcional
kv=[kv1,0;0,kv2]; %ganancia derivativa

%par gravitacional
G=[38.46*sin(q(1))+1.82*sin(q(1)+q(2));
1.82*sin(q(1)+q(2))];

%Longitudes de los eslabones
l1=0.45; l2=0.45;

x=.3+.20*sin(t);
y=-.3+.20*cos(t);

%Cinematica inversa del robot 2gdl
[qd1 qd2]=cinv_r2gdl(l1,l2,x,y);

%Posición deseada
qd=[qd1;qd2];
%Error de posición obtenido
qtil=[qd(1)-q(1); qd(2)-q(2)];

%Ley de control aplicado
tau=kp*(qtil)-kv*(qp)+G;
end
    
```

**Código fuente 2.4:** cinemática directa del robot antropomórfico 2gdl [3].

```

function [x0, y0,
z0]=cinematica_r2gdl(beta1,l1,q1,beta2,l2,q2)
dato1=whos('beta1'); dato2=whos('l1'); dato3=whos('q1');
dato4=whos('beta2'); dato5=whos('l2'); dato6=whos('q2');
v1=strcmp(dato1.class, 'sym'); v2=strcmp(dato2.class, 'sym');
v3=strcmp(dato3.class, 'sym'); v4=strcmp(dato4.class, 'sym');
v5=strcmp(dato5.class, 'sym'); v6=strcmp(dato6.class, 'sym');
digits(3);

if (v1 & v2 & v3 & v4 & v5 & v6) %caso simbólico
    x0=simplify(vpa(l1*cos(q1)+l2*cos(q1+q2),3));
    y0=simplify(vpa(l1*sin(q1)+l2*sin(q1+q2),3));
    z0=vpa(beta1+beta2,3);
else %caso numérico
    x0=l1*cos(q1)+l2*cos(q1+q2);
    y0=l1*sin(q1)+l2*sin(q1+q2);
    z0=beta1+beta2;
end
    
```

**Código fuente 2.5** cinemática inversa robot articulado 2gdl [3].

```

%cinemática inversa robot r2gdl
function [q1 q2]=cinv_r2gdl(l1,l2,x0,y0)
q2=acos((x0.*x0+y0.*y0-l1*l1-l2*l2)/(2*l1*l2));
q1=atan(y0./x0)-atan((l2*sin(q2))./(l1+l2*cos(q2)));
end
    
```



El algoritmo que se muestra en el código fuente 2.3 es el que tiene como objetivo implementar el algoritmo de control y la estimación del error a partir de la función que se desea trazar. En este algoritmo las unidades de la posición se encuentran expresadas en grados, se inserta la ecuación que describe el perímetro deseado en este caso de un círculo, la cual resulta como la posición deseada, se realiza la estimación del error entre la posición deseada y la posición actual de cada elemento.

La cinemática directa del robot es importante porque nos describe el espacio de trabajo del robot y se muestra en el código fuente 2.4.

La cinemática inversa la colocamos dentro de la función de energía para poder obtener nuestras posiciones deseadas, ya que nos convierte de coordenadas cartesianas a coordenadas articulares y se muestra en el código fuente 2.5 [3].

## 2.2 Diseño de algoritmo de control con índices de desempeño para robot SCARA.

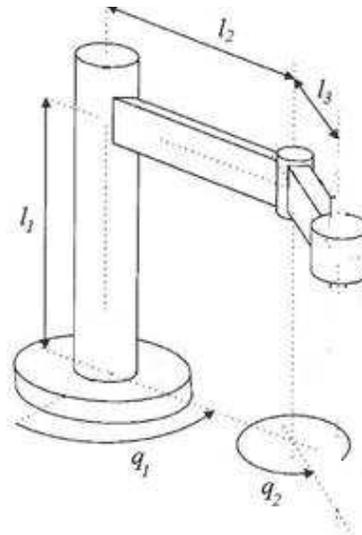


Figura 2.2: Robot SCARA.

En esta sección se realizará el algoritmo de control del robot SCARA para verificar su índice de desempeño, donde se utilizarán diferentes funciones como la cinemática inversa, la cinemática directa, modelo dinámico y la energía de control aplicada al robot SCARA

La tarea que se le va asignar al robot es una trayectoria con centro en (0.3,-.03) y radio de 0.20 m. los valores obtenidos serán usado para comparar el desempeño. Para la simulación del robot SCARA, es necesario implementar tres diferentes algoritmos. El primer algoritmo contiene la estructura principal, la cual contiene la función ODE45 para realizar la simulación del sistema, se obtienen los valores del error y la trayectoria de movimiento de cada eslabón, se realiza el cálculo para la obtención del índice de desempeño; para este cálculo es necesario la declaración de una variable global en nuestro caso es error la cual se vincula con otra variable del algoritmo de energía aplicada al robot. En la siguiente subsección obtienen la representación de las gráficas, entre las que se incluyen la trayectoria trazada por el sistema, y la gráfica de error de posición. El algoritmo implementado se muestra en el código fuente 2.6.



**Código fuente 2.6** Algoritmo de control robot SCARA

```
%Programa principal
clc;
clear all;
close all;
format short g
global error
ti=0;
h=0.025; %Periodo de muestreo
tf = 10;
t=ti:h:tf; %vector tiempo
ci=[0; 0; 0; 0]; %Declaración de condiciones iniciales
opciones=odeset('RelTol',h*1e-3,'InitialStep', h,'MaxStep',h);
%solución numérica del modelo dinámico del robot SCARA con
control PD
[t,x]=ode45('mode_dina_robot2gd11',t,ci,opciones);
%Parametros de posición y velocidad
q1=x(:,1);
q2=x(:,2);
qp1=x(:,3);
qp2=x(:,4);
[n,m]=size(t);
xef=zeros(n,1);
yef=zeros(n,1);
%Espesor de los servomotores del robot
beta1=0.15; beta2=0.15;
l1=0.45; l2=0.45; l3=.4; d3=0.2;
%Cinemática directa del robot SCARA para describir el espacio de
trabajo
[xef,yef,zef]=cinematica_SCARA(beta1,beta2,l1,l2,l3,q1,q2,d3);
%Función para el trazado del rombo
%xf=0.2.*(cos(t)).^3+0.3;
%yf=0.2.*(sin(t)).^3-0.3;
%Función para el trazado del círculo
xf=.3+.20*sin(t);
yf=-.3+.20*cos(t);
%Parametros de error
ebrazo=error(1,:);
ecodo=error(2,:);
%Calculo de la norma 1
errort=ebrazo+ecodo;
[m,n]=size(errort);
acum_error=0;
i=1;
%Integración numérica
for k=0:h:10
    acum_error=acum_error+h*(ebrazo(i)^2+ecodo(i)^2);
    i=i+1;
end
norma_tan=sqrt(acum_error/h)
```

**Código fuente 2.7.** Función de modelo dinámico robot SCARA

```
function xp =mode_dina_robot2gd11(t,x)
global error

%Paso de parámetros
q = [x(1);x(2)]; %vector de posición articular
qp = [x(3);x(4)];%vector de velocidad articular

%matriz de inercia M(q)
M=[2.351+0.1676*cos(q(2)),
0.102+0.0838*cos(q(2));
0.102+0.0838*cos(q(2)), 0.102];
%matriz de fuerzas centripetas y de Coriolis
C=[-0.1676*sin(q(2))*qp(2), -
0.084*sin(q(2))*qp(2);
0.084*sin(q(2))*qp(1), 0.0];
%par gravitacional
gq=[38.46*sin(q(1))+1.82*sin(q(1)+q(2));
1.82*sin(q(1)+q(2))];
%fricción viscosa
fr=[2.288*qp(1);
0.175*qp(2)];

%Algoritmo de control
[error1,tau] = energia_control2(t,q,qp);
error=horzcat(error,error1);

%ecuación en lazo cerrado
qpp = inv(M)*(tau-C*qp-gq-fr);

%vector de salida
xp = [qp(1); qp(2); qpp(1); qpp(2)];
```

El algoritmo del código fuente 2.7 contiene los valores del modelo dinámico del robot, así como también hace llamada a la función energía\_control2, la cual contiene el controlador a implementar.

El algoritmo del el código fuente 2.8.es el que tiene como objetivo implementar el algoritmo de control y la estimación del error a partir de la función que se desea trazar. En este algoritmo las unidades de la posición se encuentran expresadas en grados, se inserta la ecuación que describe el perímetro deseado en este caso de un círculo, la cual resulta como la posición deseada, se realiza la estimación del error entre la posición deseada y la posición actual de cada elemento.



**Código fuente 2.8** función de energía de control para robot SCARA.

```

function [qtil tau] = energia_control2(t,x,xp)
q=[x(1);x(2)]; %posiciones
qp=[xp(1); xp(2)];%velocidades

%Valores de las ganancias proporcional y derivativa
kp1=75;
kp2=7.5;
kv1=kp1*0.5;
kv2=kp2*0.5;
kp=[kp1,0;0,kp2]; %ganancia proporcional
kv=[kv1,0;0,kv2]; %ganancia derivativa

%par gravitacional es igual a cero debido a la posicion
de los brazos son
%horizontales
G=0;

%Longitudes de los eslabones
l1=0.45; l2=0.45; l3=0.45;
%Espesor de los servomotores del robot
beta1=0.15; beta2=0.15;

x=-.3+.20*sin(t);
y=-.3+.20*cos(t);
z=.1

%Cinematica inversa del robot 2gld
[dd3 qd2 qd1]=cinv_SCARA(beta1,beta2,l1,l2,l3,x,y,z);

%Posición deseada
qd=[qd1;qd2];
%Error de posición obtenido
qtil=[qd(1)-q(1); qd(2)-q(2)];

%Ley de control aplicado
tau=kp*(qtil)-kv*(qp)+G;
end
    
```

**Código fuente 2.9** cinemática directa del robot SCARA. [3].

```

function [x0, y0,
z0]=cinematica_SCARA(beta1,beta2,l1,l2,l3,q1,q2,d3)
x0=l2*cos(q1)+l3*cos(q1+q2);
y0=l2*sin(q1)+l3*sin(q1+q2);
z0=l1+beta1+beta2-d3;
end
    
```

**Código fuente 2.10** cinemática inversa robot SCARA [3].

```

function [d3 q2
q1]=cinv_SCARA(beta1,beta2,l1,l2,l3,x0,y0,z0)
q2=acos((x0.*x0+y0.*y0-l2*l2-l3*l3)/(2*l2*l3));
q1=atan(y0./x0)-atan((l3*sin(q2))./(l2+l3*cos(q2)));
d3=l1+beta1+beta2-z0;
end
    
```

La función de cinemática directa del robot es importante porque nos describe el espacio de trabajo del robot y se muestra en el código fuente 2.9.

La función de cinemática inversa la colocamos dentro de la función de energía para poder obtener nuestras posiciones deseadas, ya que nos convierte de coordenadas cartesianas a coordenadas articulares y se muestra en el código fuente 2.10.

**2.3 Diseño de algoritmo de control con índices de desempeño para robot cartesiano.**

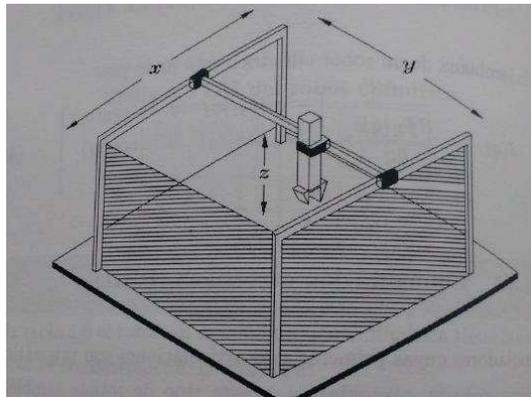


Figura 2.3: Robot cartesiano [3].



En esta sección se realizara el algoritmo de control del robot cartesiano para verificar su índice de desempeño, donde se utilizaran diferentes funciones como la cinemática inversa, el modelo dinámico, la cinemática directa, y la energía de control aplicada al robot cartesiano.

La tarea que se le va asignar al robot es una trayectoria con centro en (0.3,-.03) y radio de 0.20 m. los valores obtenidos serán usado para comparar el desempeño.

Para la simulación del robot cartesiano, es necesario implementar tres diferentes algoritmos. El primer algoritmo contiene la estructura principal, la cual contiene la función ODE45 para linealizar el modelo dinámico, así como también se obtienen los valores del error y la trayectoria de movimiento de cada eslabón, se realiza el cálculo para la obtención del índice de desempeño; para este cálculo es necesario la declaración de una variable global en nuestro caso es error la cual se vincula con otra variable del algoritmo de energía aplicada al robot. En la siguiente subseccion se muestran las gráficas, entre las que se incluyen la trayectoria trazada por el sistema y la gráfica de error de posición. El algoritmo principal implementado para el robot cartesiano se muestra en el código fuente 2.11.

**Código fuente 2.11** Algoritmo de control robot cartesiano.

```
%Programa principal
clc;
clear all;
close all;
format short g
global error
ti=0;
h=0.025; %Periodo de muestreo
tf = 10;
t=ti:h:tf; %vector tiempo
ci=[0; 0; 0; 0; 0; 0]; %Declaración de condiciones
iniciales
opciones=odeset('RelTol',h*1e-3,'InitialStep',
h,'MaxStep',h);
%solución numerica del modelo dinámico del robot
cartesiano y control PD
[t,x]=ode45('mode_dina_robot_cartesiano3gdl',t,ci,opciones);
%Parametros de posición y velocidad
q1=x(:,1);
q2=x(:,2);
q3=x(:,3);
qp1=x(:,4);
qp2=x(:,5);
qp3=x(:,6);
[n,m]=size(t);
xef=zeros(n,1);
yef=zeros(n,1);
zef=zeros(n,1);
%Espesor de los servomotores del robot
beta1=0.15; beta2=0.15; beta3=0.15;
l1=0.45; l2=0.45; l3=0.45;
%Cinemática directa del robot cartesiano para
describir el espacio de trabajo
[xef,yef,zef]=cinematica_cartesiano(q3,q2,q1);
%Función para el trazado del círculo
xf=.3+.20*sin(t);
yf=-.3+.20*cos(t);
zf=0.5;
%Parametros de error%empieza
ex=error(1,:);
ey=error(2,:);
%Calculo de la norma l
error1=ex+ey;
[m,n]=size(error1);
acum_error=0;
i=1;
%Integración numerica
for k=0:h:10
    acum_error=acum_error+h*(ex(i)^2+ey(i)^2);
    i=i+1;
end
norma tan=sqrt(acum_error/h)
```

**Código fuente 2.12.** Función de modelo dinámico robot cartesiano

```
function xp = mode_dina_robot_cartesiano3gdl(t,x)
global error
q = [x(1); x(2); x(3)]; % Vector de posición articular
qp=[x(4); x(5); x(6)]; % vector de velocidad articular
%parámetros del robot cartesiano
m1=0.7; m2=0.28; m3=0.28; % masas de los servomotores y
partes mecánicas
b1=0.02; b2=0.08; b3=.02; % coeficientes de fricción
viscosa
fc1=0.01; fc2=0.07; fc3=.02; % coeficientes de la
fricción de Coulomb
fel=0.015; fe2=0.076; fe3=0.022; % coeficientes de
la fricción estática
g=9.81; % constante de aceleración gravitacional
B=[b1, 0, 0;
0, b2, 0;
0, 0, b3];

Fc=[fc1, 0, 0;
0, fc2, 0;
0, 0, fc3];
% matriz de masas
M = [m1+m2+m3, 0, 0;
0 m1+m2, 0;
0 0 m3];

par_grav = g*[m1+m2+m3; 0;0]; %vector de par de
gravitacional
%fricción estática
fe=[ fel*(1-abs(sign(qp(1)))); fe2*(1-abs(sign(qp(2))))];
fe3*(1-abs(sign(qp(3))))];

% fr= B*qp+Fc*sign(qp)+fe;
fr=B*qp;

%tau=[ g*(m1+m2+m3)+ 0.05*sin(t); (1-exp(-
0.5*t))*0.13*sin(t);0.06*sin(t)];

%Algoritmo de control
[error1,tau] = energia_control2(t,q,qp);
error=horzcat(error,error1);

%[~,tau] = energia_control2(t,q,qp);
% Vector de aceleración articular
qpp = inv(M)*(tau- par_grav-fr);

% Vector de salida
```



**Código fuente 2.13** función de energía de control para robot Cartesiano.

```
function [qtil tau] = energia_control2(t,x,xp)
q=[x(3);x(2); x(1)]; %posiciones
qp=[xp(3); xp(2); xp(1)];%velocidades
%Valores de las ganancias proporcional y derivativa
kp1=75;
kp2=7.5;
kp3=7.5;
kv1=kp1*0.5;
kv2=kp2*0.5;
kv3=kp3*0.5;
kp=[kp1,0,0;0,kp2,0;0,0,kp3]; %ganancia proporcional
kv=[kv1,0,0;0,kv2,0;0,0,kv3]; %ganancia derivativa

%parámetros del robot cartesiano
m1=0.7; m2=0.28; m3=0.28; % masas de los servomotores
y partes mecánicas
g=9.81; % constante de aceleración gravitacional
par_grav = g*[m1+m2+m3; 0;0]; %vector de par de
gravitacional
%Longitudes de los eslabones
l1=0.45; l2=0.45; l3=0.45;

x=.3+.20*sin(t);
y=-.3+.20*cos(t);
z=1;

%Cinematica inversa del robot 2gld
[qd3 qd2 qd1]=cinv_cartesiano(x,y,z);

%Posición deseada
qd=[qd3;qd2;qd1];
%Error de posición obtenido
qtil=[qd(3)-q(3); qd(2)-q(2); qd(1)-q(1)];

%Ley de control aplicado
tau=kp*(qtil)-kv*(qp)+par_grav;
end
```

**Código fuente 2.14** cinemática directa del robot cartesiano [3].

```
function [q3, q2, q1]=cinv_cartesiano(x0,y0,z0)
q3=x0; q2=y0; q1=z0;
end
```

**Código fuente 2.15** cinemática inversa del robot cartesiano.[3]

```
function [x0, y0, z0]=cinematica_cartesiano(q3,q2,q1)
dato1=whos('q1'); dato2=whos('q2'); dato3=whos('q3');
v1=strcmp(dato1.class, 'sym'); v2=strcmp(dato2.class,
'sym');
v3=strcmp(dato3.class, 'sym'); digits(3);

if ( v1 & v2 & v3) %caso simbólico
x0=q3; y0=q2; z0=q1; x0=vpa(x0); y0=vpa(y0);
z0=vpa(z0);
else %caso numérico
x0=q3; y0=q2; z0=q1;
end
```

El algoritmo del código fuente 2.12 contiene los valores del modelo dinámico del robot, así como también hace llamada a la función `energia_control2`, la cual contiene el controlador PD a implementar.

El siguiente algoritmo del código fuente 2.13. Es el que tiene como objetivo implementar el algoritmo de control y la estimación del error a partir de la función que se desea trazar. En este algoritmo las unidades de la posición se encuentran expresadas en grados, se inserta la ecuación que describe el perímetro deseado en este caso de un círculo, la cual resulta como la posición deseada, se realiza la estimación del error entre la posición deseada y la posición actual de cada elemento.

La cinemática directa del robot es importante porque nos describe el espacio de trabajo del robot y se muestra en el código fuente 2.14.

La cinemática inversa la colocamos dentro de la función de energía para poder obtener nuestras posiciones deseadas, ya que nos convierte de coordenadas cartesianas a coordenadas articulares y se muestra en el código fuente 2.15.

### 3. Resultados

En esta sección se mostraran las trayectorias realizadas por cada uno de los robots y la graficas de error que tuvo cada eslabón, para visualizar el desempeño entregado respecto a la misma trayectoria programada, con igual control PD, y misma longitud de eslabones en los tres algoritmos de control para hacer una comparación lo más justa posible.

El índice de desempeño se evaluara con la norma  $L_2$ , esta ecuación se introduce dentro del algoritmo de control de cada uno de los robots, donde se almacenaran en la variable `acum_error` todos los errores de posición de los ejes utilizados para realizar la trayectoria programada, en un tiempo de muestreo del experimento de 10 segundos, en este lapso de tiempo se obtendrán 2500.00 muestras, que serán graficadas para visualizar el resultado obtenido de cada uno de los robots, la



integración numérica de los errores en un tiempo de muestreo  $T$  será evaluado por la norma  $L_2$  y el valor será impreso para visualizar el valor obtenido del algoritmo de cada una de las estructuras y graficado posteriormente para la comparación entre los robots, entre más bajo sea el valor de la norma  $L_2$  es más pequeño el error de posición y más preciso el robot en sus movimientos, en caso contrario cuando es más alto el valor de la norma  $L_2$  es mayor el error de posición y menos preciso el robot en sus movimientos.

### 3.1 Resultados obtenidos del robot antropomórfico de 2GDL.

En la figura 3.1 se presenta la trayectoria realizada por el robot antropomórfico, usando un control Proporcional derivativo.

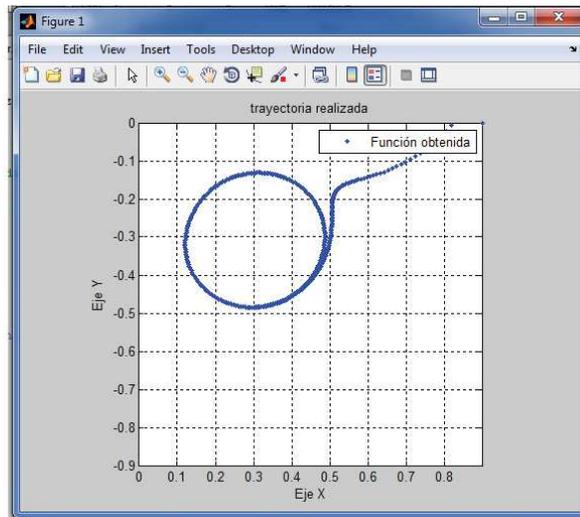


Figura 3.1 Trayectoria realizada por el robot antropomórfico 2GDL.

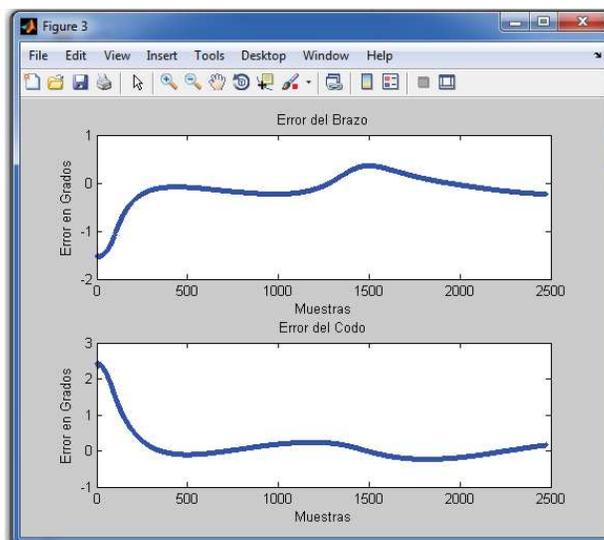


Figura 3.2: Errores de posicionamiento del codo y del brazo del robot antropomórfico de 2GDL.



En la figura 3.2 se muestra el error que presentan la articulación del brazo y el codo, con respecto al punto deseado, se puede observar en ambas gráficas está presente el error, obteniendo como resultado que la trayectoria trazada difiere de la trayectoria real. En ambas señales el error presenta un comportamiento oscilatorio con una variación de dos grados al inicio de la trayectoria.

### 3.2 Resultados obtenidos del robot SCARA.

En la figura 3.3 se presenta la trayectoria realizada por el robot SCARA, usando un control proporcional derivativo

En este caso el robot intenta realizar el trazado de la trayectoria dada, Se observa que al sistema del robot, realiza una circunferencia con poca precisión, Por lo que se puede considerar que el seguimiento de una trayectoria del robot SCARA resulta con errores de posición similares a los del robot antropomórfico

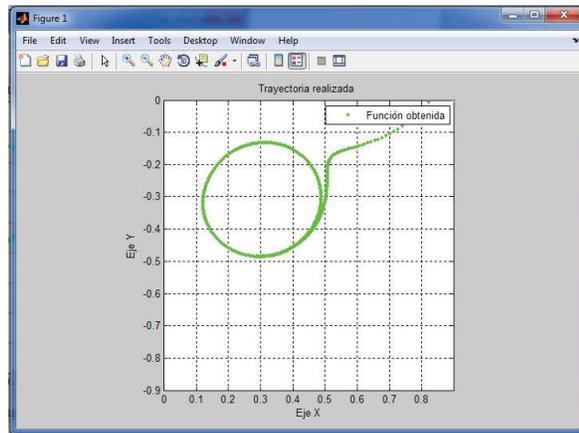


Figura 3.3: Trayectoria realizada por el robot SCARA.

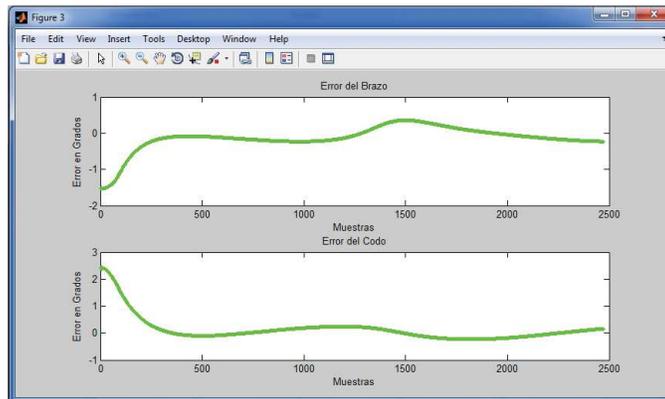


Figura 3.4: Errores de posicionamiento del codo y el brazo del robot SCARA.



En la figura 3.4 se muestra el error que presentan la articulación del brazo y el codo, con respecto al punto deseado, se puede observar en ambas gráficas está presente el error de 2.5 grados el codo y 1.5 grados el brazo, obteniendo como resultado que la trayectoria trazada difiere de la trayectoria real. En ambas señales el error presenta un comportamiento oscilatorio.

### 3.3 Resultados obtenidos del robot cartesiano.

En la figura 3.5 se presenta la trayectoria realizada por el robot cartesiano, usando un control Proporcional derivativo.

En este caso el robot intenta realizar el trazado de la trayectoria dada, Se observa que al sistema del robot, le resulta más fácil realizar el trazado del círculo que el robot antropomórfico y el robot SCARA, Por lo que se puede considerar que tiene un mejor desempeño.

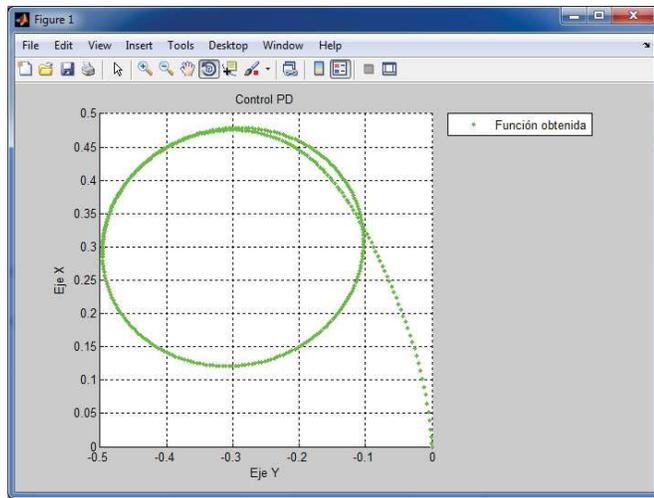


Figura: 3.5 Trayectoria realizada por el robot cartesiano.

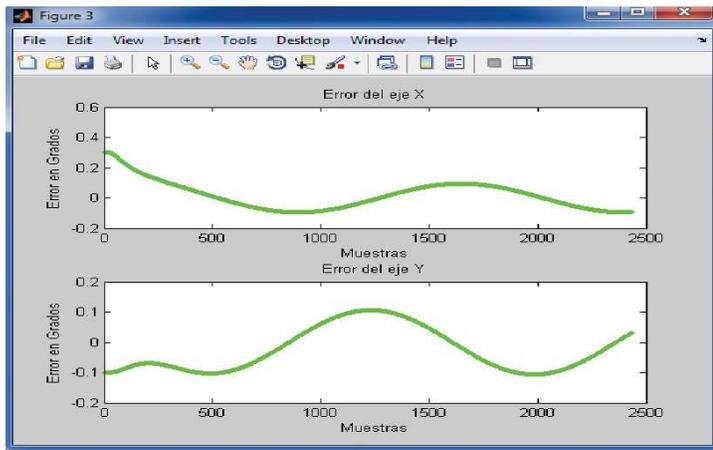


Figura: 3.6 Errores de posición del robot cartesiano.



En la figura 3.6 se muestra el error que presentan la articulaciones del Robot cartesiano, con respecto al punto deseado, se puede observar en ambas gráficas está presente el error de 0.1 y 0.3 grados, obteniendo como resultado que la trayectoria trazada difiere muy poco de la trayectoria real.

En ambas señales el error presenta un comportamiento oscilatorio pero con más precisión que los robots anteriores.

### 3.4 Comparación numérica entre arquitecturas.

Los siguientes resultados que obtuvimos de los experimentos realizados nos podrán dar una visión clara y precisa del desempeño de cada una de las estructuras robóticas, para esto es necesario conocer y tener el modelo matemático y los parámetros del robot para poder hacer una simulación del algoritmo que nos arroje los valores más precisos posibles, con este método de simulación no es necesario tener el robot físicamente para conocer su índice de desempeño; ya que si se desea conocer el desempeño de cualquier robot industrial y su comportamiento en alguna tarea específica, se puede hacer siguiendo los mismos pasos que hemos realizado en esta presente investigación, y de esta forma podrán seleccionar robots que se adecuen a sus actividades y necesidades, sin tener que adquirir robots demasiados sobrados en capacidades para tareas sencillas en sus procesos industriales, esto ayudara a mejorar la selección de robots.

Actualmente el alto nivel industrial alcanzado, exige una constante optimización en los diseños mecánicos. En el campo de la robótica esta tendencia ha llevado a diseñar robots cada vez más precisos.

A continuación se muestran los valores de índice de desempeño obtenidos de la simulación de los algoritmos simulados en MATLAB calculados por la norma  $L_2$  en la tabla número 1.

**Tabla 1. Valores obtenidos del índice de desempeño.**

Robot	Índice de desempeño
Antropomórfico	28.43
SCARA	29.59
Cartesiano	3.84

En la figura 3.7 Se muestra la gráfica de comparación entre el robot antropomórfico, robot SCARA y el robot cartesiano utilizando el valor de la norma  $L_2$  de cada robot obtenido en el algoritmo utilizando un control proporcional derivativo para el trazado de una circunferencia.

En la grafica se observa como el robot Scara y el robot Antropomórfico tiene un desempeño casi igual pero bajo en comparación con el robot cartesiano, utilizando el control PD con los mismos valores de ganancias proporcional y derivativa  $K_p$  y  $K_v$ , respectivamente, lo que los diferencia es el error de posición que tuvieron en la trayectoria realizada.

En la práctica el programador de algoritmos para robots puede sintonizar las ganancias proporcional y derivativa  $K_p$  y  $K_v$ , respectivamente, del control PD o de cualquier otro control que implemente en su algoritmo, con una buena sintonización puede disminuir el error de posición y de esta forma tener un mejor índice de desempeño.

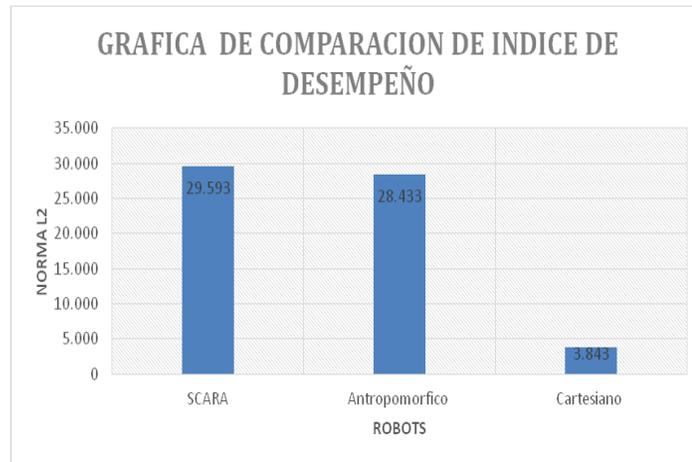


Figura 3.7 Grafica de comparación de índice de desempeño.

#### 4. Conclusiones.

La presente investigación ayuda a comprender la mecánica de movimiento de los robots, En el programa Matlab se hace la simulación sin la necesidad de construir un robot físicamente, en el laboratorio de la facultad de ciencias de la ingeniería electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla se utilizó un robot de transmisión directa de 3GDL, ahí se realizaron simulaciones y se manipulan las variables para observar los diferentes efectos de las trayectorias programadas, que nos ayudaron a comprender las ecuaciones de control que se aplican al robot para realizar los movimientos.

Es importante aterrizar los conocimientos a la realidad física y así tener un mejor entendimiento de las ecuaciones de movimiento mecánico, hay una gran variedad de aplicaciones que requieren un índice de desempeño óptimo como en la medicina para realizar cirugías precisas con la ayuda de robots y la industria de manufactura que es importante el tiempo de fabricación de un producto, nos dimos a la tarea de desarrollar un algoritmo que nos permita medir el desempeño en tres estructuras mecánicas, programándoles como tarea una circunferencia, con la ayuda del programa Matlab que es un programa bastante versátil, se ingresaron funciones que el algoritmo principal va llamando y obteniendo valores de cada función como los errores de posición, con estos datos obtenidos se calcula la norma  $L_2$ , con la que medimos el índice de desempeño, al obtener la trayectoria realizada y las gráficas de error de cada una de las estructuras se puede observar quien hizo una mejor tarea, en nuestro caso la circunferencia la dibujo mejor el robot Cartesiano y tuvo un índice de desempeño mucho mejor; por ser el valor de la norma  $L_2$  más bajo.

Esta investigación queda abierta para futuros investigadores que requieran adentrarse en este tema ya que la infinidad de posibilidades para medir el índice de desempeño de un robot son muchas y pueden tomar como base este presente trabajo para seguir desarrollando investigación que aporte conocimiento científico a la sociedad.



## Referencias

- [1] Craig J. J. "Robotica" Pearson Educación de México SA. De CV:, Tercera edición, 2006.
- [2] Reyes F. "Control de robots manipuladores", Alfaomega, México, Primera edición, 2011.
- [3] Reyes F. "Matlab aplicado a robótica y mecatrónica", Alfaomega, México, Primera edición, 2012.
- [4] Asada H. A. Geometrical Representation of manipulator dynamics and it's application to arm design Journal of Dynamic system, measurement, and control Transactions of the ASME,150(3), 131-142, (1983).
- [5] Kumar S, introducción a la robótica, México: Mc Graw Hill Interamericana, 2008.
- [6] Barrientos A, Peñin L. F, Balaguer C, Aracil R, Fundamentos de la Robótica, Madrid, Mc-Graw Hill Interamericana de España, Segunda edición 2007.
- [7] Ollero A, Robótica, Manipuladores y robots Móviles, Barcelona; Marcombo, Alfaomega 2007.
- [8] Salido J. Cibernética aplicada a Robots educativos, México, Alfaomega 2009.
- [9] Reza N. Jazar Theory of Applied robotics (electronic resource) Kinematics, dynamics and control, New York, Springer, second edition 2010.
- [10] Angeles J. Fundamental of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms New York Springer second edition 2007.
- [11] Manseur R. Robot Modeling and Kinematics Boston: Da Vinci Engineering Press 2006.
- [12] Dombre Etienne, khalil Wisama, Modeling, Performance, Analysis and control of robots manipulators, London; Newport Beach, CA: ISTE, 2007.
- [13] Alterovits R. Goldberg K., Motion Planning and Medicine: optimization and simulations algorithms for image-guided procedure/R Berlin: Springer Verlag, 2008.
- [14] Saeed.B. Niku Introduction to robotics: Analysis, control, Applications, New York: Wiley, second edition 2010.
- [15] Whitcomb L.L., Rizzi A.A. & Koditschek D.E., Comparative experiments with a new adaptive controller for robot arms, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 9(1), 1993, 59-69.



# Diseño de un Controlador PID Usando Memristores

Ortiz-López Judith Azucena<sup>1</sup>, Sánchez-López Carlos<sup>2</sup>,  
Gutiérrez-Fonseca Silvia Patricia<sup>1</sup>, Rivera-Medinilla Francisco Javier.

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Agua Prieta, 84279 Agua Prieta, Sonora, México

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Tlaxcala, 90300 Apizaco, Tlaxcala, México

E-mail: [judithazucena@hotmail.com](mailto:judithazucena@hotmail.com), [carlsanmx@yahoo.com.mx](mailto:carlsanmx@yahoo.com.mx),  
[silvia\\_gtz\\_f@hotmail.com](mailto:silvia_gtz_f@hotmail.com), [medinilla11@hotmail.com](mailto:medinilla11@hotmail.com)

## Resumen

*Este trabajo aborda el diseño de un controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) usando memristores. En un primer paso y para controlar un filtro de paso-bajo de segundo orden, se diseña un controlador PID tradicional con coeficientes constantes. En un segundo paso, un circuito emulador de memristancia controlado por carga, el cual puede ser configurado como memristor del tipo decremental o incremental es diseñado. En un tercer paso, el circuito emulador de memristor junto con el controlador PID previamente diseñados, son fusionados para conseguir un controlador PID usando memristores (PIDM). Como una consecuencia, el tiempo de subida y el tiempo de bajada del sistema controlado pueden ser reconfigurados en línea mediante la modificación conveniente de la memductancia. Simulaciones numéricas obtenidas de MATLAB para cada caso son mostradas. Posteriormente, el circuito emulador de memristor y los controladores PID y PIDM son sintetizados con elementos discretos y simulaciones numéricas obtenidas de SPICE son mostradas afín de corroborar la teoría.*

**Palabras clave:** Controlador PID, Memristor, Lazo de Histéresis, Control Industrial.

## 1. Introducción.

Actualmente, el controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) es el sistema de control más usado para controlar un proceso industrial, debido a su diseño simple, fácil y de bajo coste [1]-[5]. Un controlador PID consta de tres partes: la parte proporcional, la parte integral y la parte derivativa, y cada una de ellas presenta ventajas y desventajas para controlar un sistema lineal o no-lineal [1]-[5]. En cada caso, la ganancia es ajustada para obtener una respuesta óptima del sistema a controlar y el principal objetivo del controlador es reducir al mínimo el valor del error en un corto tiempo. El error es la diferencia entre un punto de ajuste y la variable de proceso medido. Sin embargo, a pesar de que un controlador PID es ampliamente utilizado para controlar un proceso industrial, la búsqueda de sus parámetros óptimos es muy difícil, especialmente cuando el proceso a controlar presenta un comportamiento complejo o no-lineal [1], [2]. Otra desventaja del controlador PID se debe a que sus parámetros son fijos y no es posible reconfigurar, en línea, el desempeño del controlador. En este sentido, varias técnicas han sido propuestas para encontrar los parámetros óptimos del controlador, tales como: control óptimo, control adaptivo, control robusto, control difuso, control usando redes neuronales artificiales y aquellas basadas en métodos inspirados en la naturaleza, tales como: algoritmos genéticos, optimización basado en el estudio de enjambres de partículas, evolución diferencial, etc. [3]-[5]. A pesar de todo ello, las técnicas antes descritas proporcionan otra vez parámetros fijos del controlador y a menudo sin ningún conocimiento del proceso a controlar, lo que limita el desempeño óptimo del controlador. Por lo tanto, una técnica eficiente para reconfigurar en línea el desempeño del controlador PID es ampliamente demandado.

Bajo este esquema, el objetivo de este trabajo es demostrar, mediante simulaciones numéricas, el análisis y diseño de un controlador PID reconfigurable en línea. Tal comportamiento se logra mediante

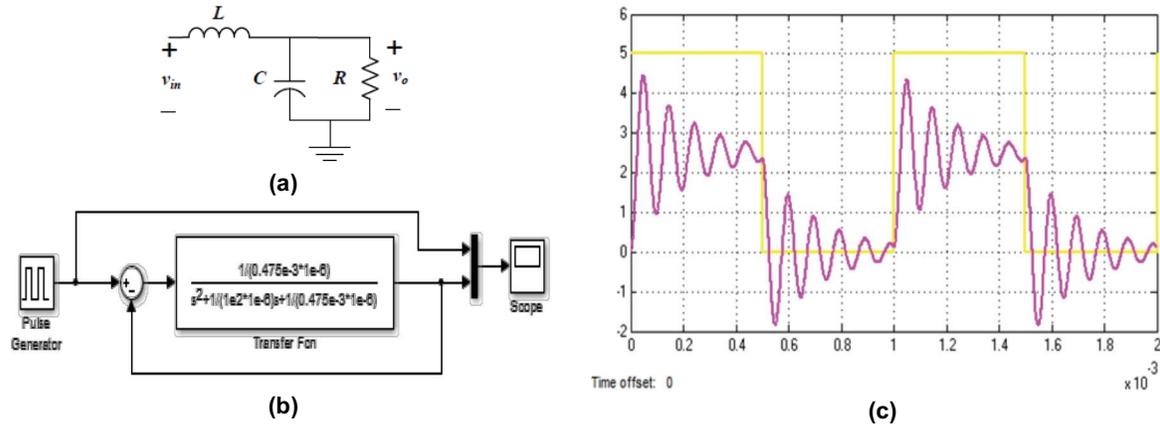


Figura 1. (a) Filtro de paso-bajo usado como planta a controlar; (b) Planta con realimentación unitaria modelado en SIMULINK; (c) Respuesta transitoria de la planta sin control.

el uso de memristores (memductores) controlados por carga, el cual puede ser configurado en modo incremental o decremental [6]-[9]. Simulaciones numéricas tanto de MATLAB como de SPICE son mostrados afín de comprobar el análisis teórico.

## 2. Controlador PID.

Controladores PID son ampliamente usados dentro de un proceso industrial, con el objetivo de controlar una planta o sistema y esta realice, de forma automática, una tarea programada [5]. Para mostrar la necesidad sobre el diseño y uso de un controlador PID, permítanos considerar la planta mostrada en la Fig. 1(a), la cual es un filtro de paso-bajo de segundo orden. Analizando la Fig. 1(a), se obtiene la siguiente función de transferencia

$$H(s) = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{LC}} = \frac{\frac{1}{(0.475mH)(1\mu F)}}{s^2 + \frac{1}{(100\Omega)(1\mu F)} + \frac{1}{(0.475mH)(1\mu F)}} \quad (1)$$

Utilizando SIMULINK bajo el ambiente de MATLAB, el comportamiento de (1) con realimentación negativa, puede ser numéricamente pronosticado utilizando la Fig. 1(b). La respuesta transitoria de la Fig. 1(b) se muestra en la Fig. 1(c), donde un tren de pulsos con amplitud de 5V y frecuencia  $f=1$  kHz ha sido aplicado (línea amarilla). De esta última figura uno puede observar que la planta necesita ser controlada (línea morada) y por lo tanto, el diseño de un controlador es muy necesario. En este contexto, un controlador PID consta de tres partes: control proporcional definido como:  $G_p=K_p$ , donde  $K_p$  es la ganancia proporcional; control integral definido como:  $G_i(s)=K_i/s$ , donde  $K_i$  es la ganancia integral; y control derivativo definido como:  $G_d(s)=K_d s$ , donde  $K_d$  es la ganancia derivativa [1]-[5]. Uniendo los tres controladores antes descritos, la función de transferencia de un controlador PID es definido como

$$G_{pid}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2)$$

Es importante subrayar que aunque (2) es un modelo ideal, este es de gran ayuda para ganar intuición sobre el comportamiento del controlador a diseñar. Para sintetizar (2) en hardware, en la literatura se han reportado varias topologías electrónicas basados en el uso de amplificadores [10]. Particularmente, Fig. 2(a) muestra un circuito electrónico que utiliza un amplificador operacional realimentado en corriente (CFOA). Analizando la Fig. 2(a), se obtiene la siguiente función de transferencia

$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{A_{v1}A_{v2}}{A_i} \left( \frac{R_{1p}}{R_{2p}} + \frac{C_{2p}}{C_{1p}} + \frac{1}{R_{2p}C_{1p}s} + R_{1p}C_{2p}s \right) \quad (3)$$

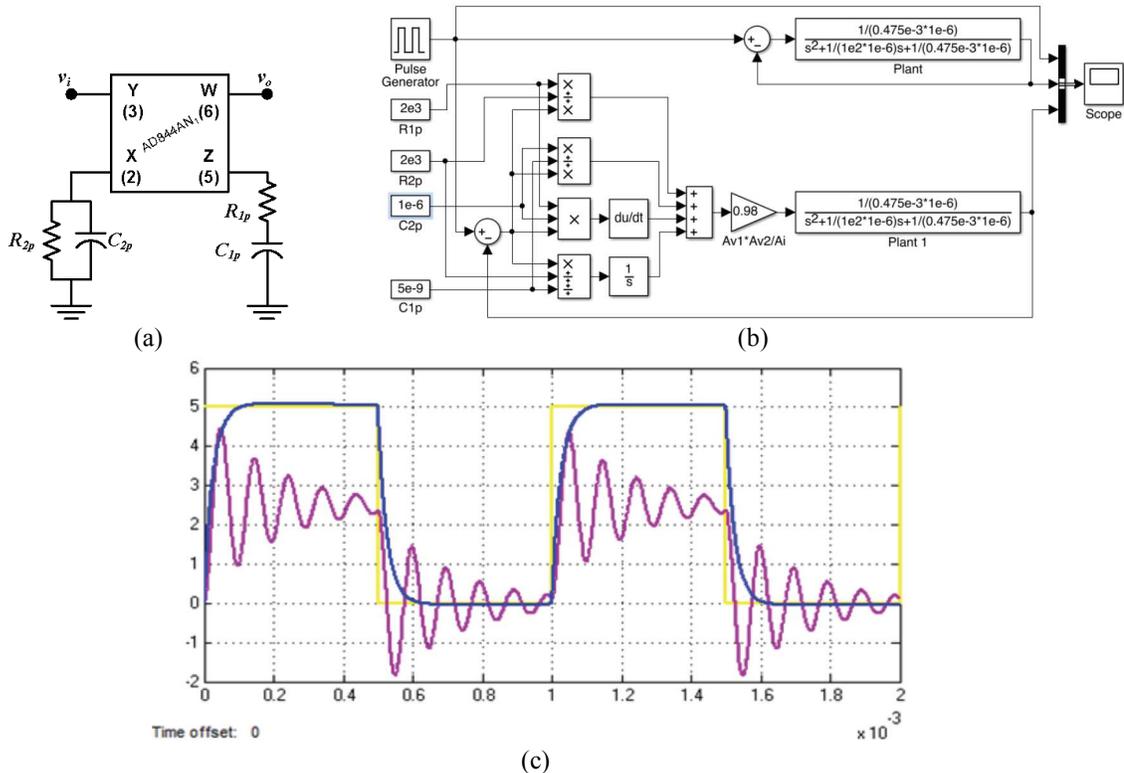


Figura 2. (a) Controlador PID usando CFOA; (b) PID+planta modelado en SIMULINK; (c) Respuestas transitorias de la planta sin control (línea morada) y con control (línea azul).

donde  $A_{V1} \approx 0.98$  es la ganancia en voltaje entre las terminales x-y del CFOA;  $A_{V2} \approx 0.98$  es la ganancia en voltaje entre las terminales w-z; y  $A_I \approx 0.98$  es la ganancia en corriente entre las terminales z-x del CFOA. Note que elementos parásitos asociados a cada terminal de entrada y salida del CFOA junto con sus parámetros de desempeño, no han sido tomados en cuenta en (3). Comparando (3) con (2), fácilmente se pueden obtener las ganancias simbólicas del controlador. De acuerdo a (1), se aproximan los parámetros del controlador PID mostrados en (2) usando el método de Ziegler-Nichols [1], dando como resultado:  $K_p = 201$ ,  $K_i = 1e5$  y  $K_d = 2e-3$ . A partir de los valores de  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , se obtiene el valor numérico para cada elemento de (3), como:  $R_{1p} = R_{2p} = 2k\Omega$ ,  $C_{1p} = 5nF$  y  $C_{2p} = 1\mu F$ . Figura 2(b) muestra el diagrama a bloques en SIMULINK de la planta (parte superior) y el controlador PID+planta (parte inferior), ambos con realimentación negativa. A partir del modelo SIMULINK, simulaciones numéricas son realizadas, las cuales se muestran en la Fig. 2(c), y uno puede observar que la planta es controlada (línea azul) y no muestra oscilaciones y sobre tiros en su respuesta transitoria. Además, también se observa que el tiempo de subida ( $t_s$ ) y tiempo de bajada ( $t_b$ ) de la respuesta controlada es simétrica y debido a que los parámetros del controlador son fijos,  $t_s$  y  $t_b$  no pueden ser reconfigurados en línea. Esta es una gran desventaja porque existen procesos de control industriales con un comportamiento no-lineal que es necesario mejorar  $t_s$  y  $t_b$  e inclusive el tiempo de respuesta. No obstante, el último comportamiento puede ser modificado si se utiliza un elemento conocido como memristor (memductor), el cual es un acrónimo de resistencia (conductancia) con memoria.

### 3. Memductor controlado por carga.

Recientemente en la literatura [6]-[9], se han propuesto circuitos emuladores de memristores (memductores), tanto en su versión flotada como en su versión aterrizada. En este trabajo, el memductor reportado en [9] es utilizado, el cual es diseñado utilizando un current conveyor de segunda generación

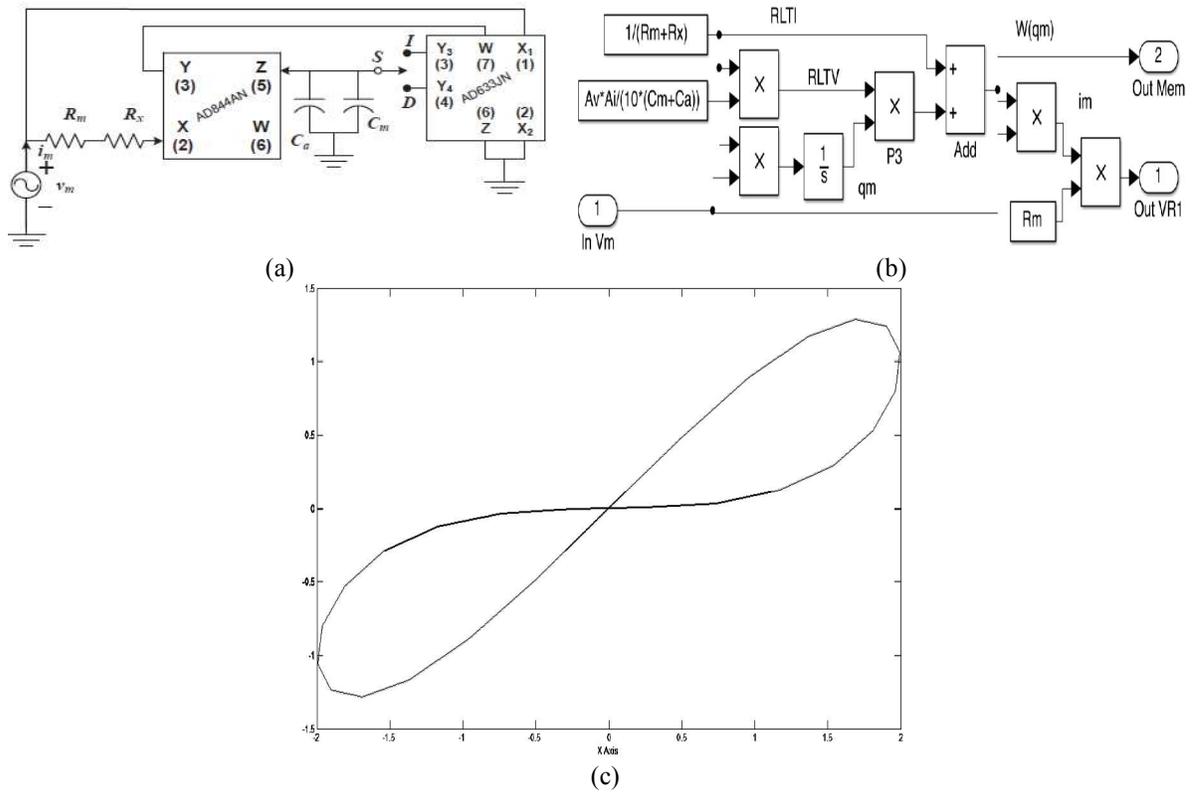


Figura 3. (a) Memductor aterrizado controlado por carga; (b) Modelo SIMULINK; (c) Lazo de histéresis pinchado en el origen trabajando a 1kHz.

positivo (CCII+) y un multiplicador de cuatro cuadrantes. De acuerdo con [9], la memductancia controlado por carga de la Fig. 3(a) es dada por

$$W(q_m) = \frac{i_m}{v_m} = \frac{1}{R_m+R_x} \pm \frac{A_v A_i}{10(R_m+R_x)(C_m+C_a)} q_m \quad (4)$$

dónde  $q_m = \int_0^t i_m(\tau) d\tau$ , la resistencia parásita  $R_x \approx 75\Omega$  y el capacitor parásito  $C_a \approx 5.5pF$  están conectados en las terminales x y z, respectivamente;  $A_v$  y  $A_i$  son la ganancia en voltaje y corriente entre las terminales x-y y z-x del CCII+. El signo positivo en (4) denota un memductor incremental mientras que el signo negativo indica un memductor decremental. A partir de (4), se observa que la memductancia es compuesta por una conductancia lineal invariante en el tiempo y una conductancia lineal variante en el tiempo. De acuerdo con [8], la corriente promedio se consigue cuando la parte lineal variante en el tiempo es cero y, por lo tanto

$$i_m = \frac{v_m}{R_m+R_x} \quad (5)$$

Usando (4) y (5), se construye en SIMULINK el modelo de comportamiento del memductor, como se ilustra en la Fig. 3(b). El memductor es diseñado para operar a 1kHz y por lo tanto el valor numérico de  $R_m=6k\Omega$  y  $C_m=0.01\mu F$ . Es importante mencionar que para lograr un memductor decremental, la segunda entrada del bloque  $A_{dd}$  de la Fig. 3(b) debe ser negativo. Aplicando una señal sinusoidal con 2V de amplitud y  $f=1kHz$  a la Fig. 3(b), se obtiene el comportamiento del lazo de histéresis pinchado en el origen y dependiente de la frecuencia, como se muestra en la Fig. 3(c). Note que para un memductor incremental, la dirección del lazo de histéresis es en el sentido de las manecillas del reloj, mientras que para un memductor decremental, la dirección es en sentido contrario a las manecillas del reloj y muestra un comportamiento similar a la Fig. 3(c) [7]. Particularmente para un memductor incremental, un tren de pulsos positivos se aplica entre sus terminales y como una consecuencia, la memductancia aumenta. Para disminuir la memductancia, un tren de pulsos negativos debe ser aplicado. Sin embargo, en el

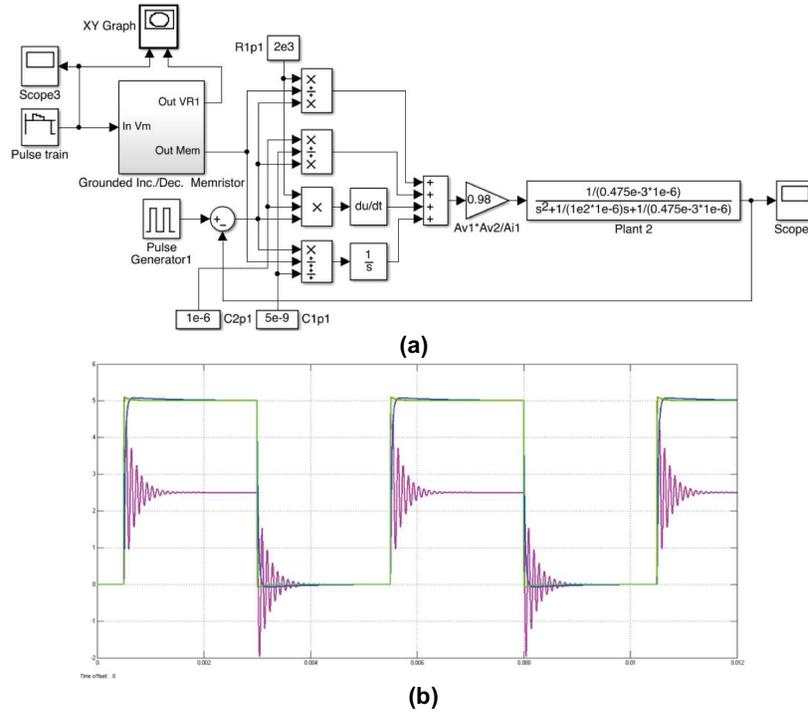


Figura 4. (a) Modelo SIMULINK del controlador PID usando el memductor aterrizado controlado por carga; (b) Respuesta transitoria del inciso (a).

intervalo de 0V para ambos pulsos positivos y negativos, la memductancia es “congelada”. Note que para un memductor decremental, el comportamiento de la memductancia es invertido con respecto al memductor incremental. Así, cuando se aplican pulsos positivos al memductor, la memductancia decremmenta mientras que para pulsos negativos, la memductancia aumenta. Para ambas topologías, si la frecuencia de la señal de entrada aumenta, el lazo de histéresis ilustrado en la Fig. 3(c) llega a ser una línea recta y por lo tanto, el memductor se convierte en una simple resistancia, perdiendo su propiedad de no-volatilidad [8], [9]. Este comportamiento puede verificarse en (4), ya que la parte lineal variante en el tiempo se aproxima a cero cuando la frecuencia aumenta, confirmando lo antes descrito. Por el contrario, si la frecuencia disminuye monótonicamente, entonces el área de los lóbulos del lazo de histéresis tienden a aumentar y el memductor también deja de emular el comportamiento de una conductancia con memoria. En este caso, la conductancia lineal variante en el tiempo de (4), llega a ser dominante.

#### 4. Controlador PID con memductor controlado por carga.

Verificando la Fig. 2(a), (3) y (4), es posible diseñar un controlador PID basado en el memductor antes descrito. En este trabajo, el resistor  $R_2$  de la Fig. 2(a) es substituido por la Fig. 3(a) y como una consecuencia, usando (4), (3) llega a ser

$$\frac{v_0(s)}{v_i(s)} = \frac{A_{v1}A_{v2}}{A_i} \left( R_{1p}W_{2p}(q_m) + \frac{C_{2p}}{C_{1p}} + \frac{W_{2p}(q_m)}{C_{1p}s} + R_{1p}C_{2p}s \right) \quad (6)$$

El diagrama a bloques en SIMULINK del controlador PID+planta+memductor+control del memductor se ilustra en a Fig. 4(a) y su respuesta transitoria se muestra en la Fig. 4(b) (línea roja). En esta última figura se puede observar que el  $t_s$  y  $t_b$  han sido mejoradas con respecto al controlador PID con parámetros fijos y con la ayuda del memductor, estas pueden ser reconfiguradas en línea. Como una

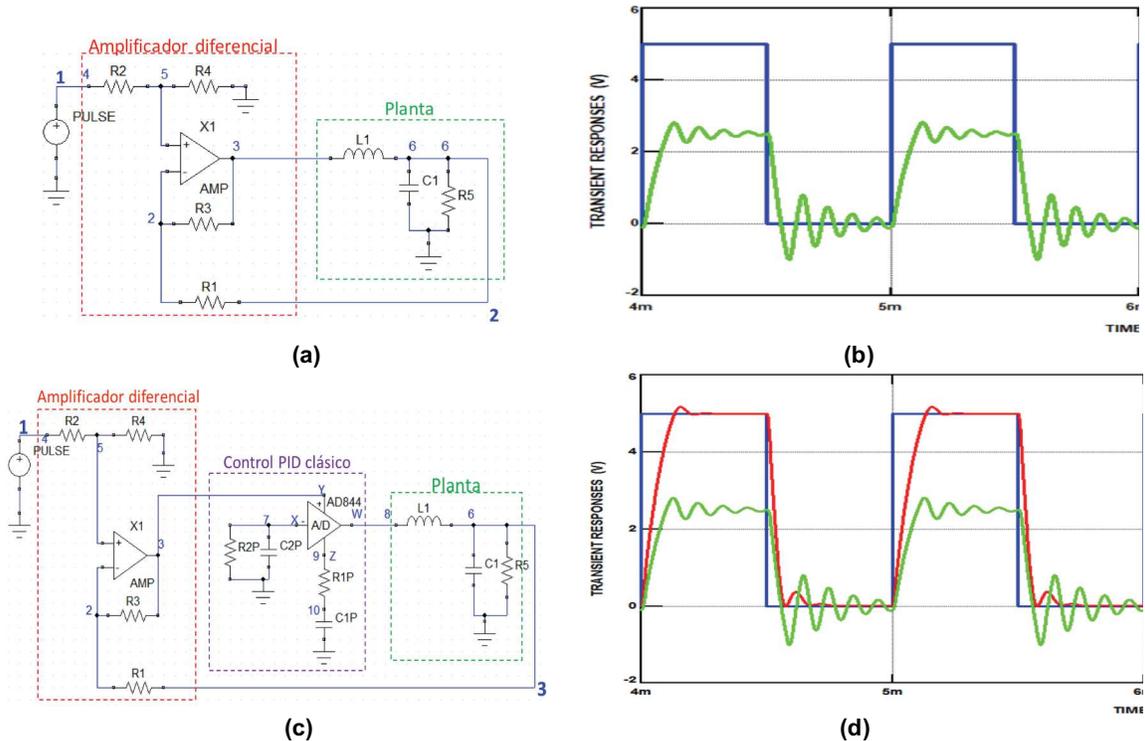


Figura 5. (a) Síntesis de la Fig. 1(b) con elementos discretos; (b) Respuesta transitoria de SPICE asociado a la planta sin control; (c) Síntesis de la Fig. 2(b); (d) Respuesta transitoria de la planta con control.

consecuencia, el uso de memductores es muy útil para controlar, independientemente, el  $t_s$  y  $t_b$  de la respuesta transitoria de un sistema con realimentación.

## 5. Resultados de SPICE

Una vez realizado la teoría y las simulaciones numéricas han sido obtenidas, el controlador PID con memductor es simulado en un simulador de circuitos, como SPICE. Es importante mencionar que aunque un modelo de comportamiento es muy ideal y generalmente solo es valido en un intervalo muy estrecho del mundo real, el diseñador en turno gana intuición sobre el comportamiento del circuito y puede predecir el comportamiento real del diseño. Bajo este esquema, Fig. 1(a), Fig. 2(a) y Fig. 3(a) son construidas en SPICE usando los mismos valores numéricos descritos arriba asociados a cada elemento pasivo. Note que los puntos de diferencia y suma de señales asociados a los controladores mostrados en la Fig. 1(b), Fig. 2(b) y Fig. 4(a) son diseñados con amplificadores operacionales.

### 5.1 Planta con realimentación unitaria y sin control PID.

En un primer paso, la Fig. 1(b) es sintetizada con amplificadores operacionales y elementos pasivos, como se muestra en la Fig. 5(a). Aplicando un pulso de entrada con 5V de amplitud y  $f=1\text{kHz}$  a la planta, se obtiene el comportamiento pronosticado en la Fig. 1(c) y como se muestra en la Fig. 5(b). Claramente se observa que no solamente la planta necesita ser controlada, sino también la forma de onda pronosticada por SIMULINK es muy diferente por aquella obtenida en SPICE. Esto se debe a que en SIMULINK, se utiliza un modelo de comportamiento ideal, mientras que en SPICE se toma en cuenta: voltajes de alimentación de  $\pm 10\text{V}$ , parámetros de desempeño del amplificador utilizado, los cuales están incrustados dentro de un macromodelo no ideal del amplificador, elementos parásitos del mismo amplificador, las tolerancias de los elementos pasivos, entre otros.

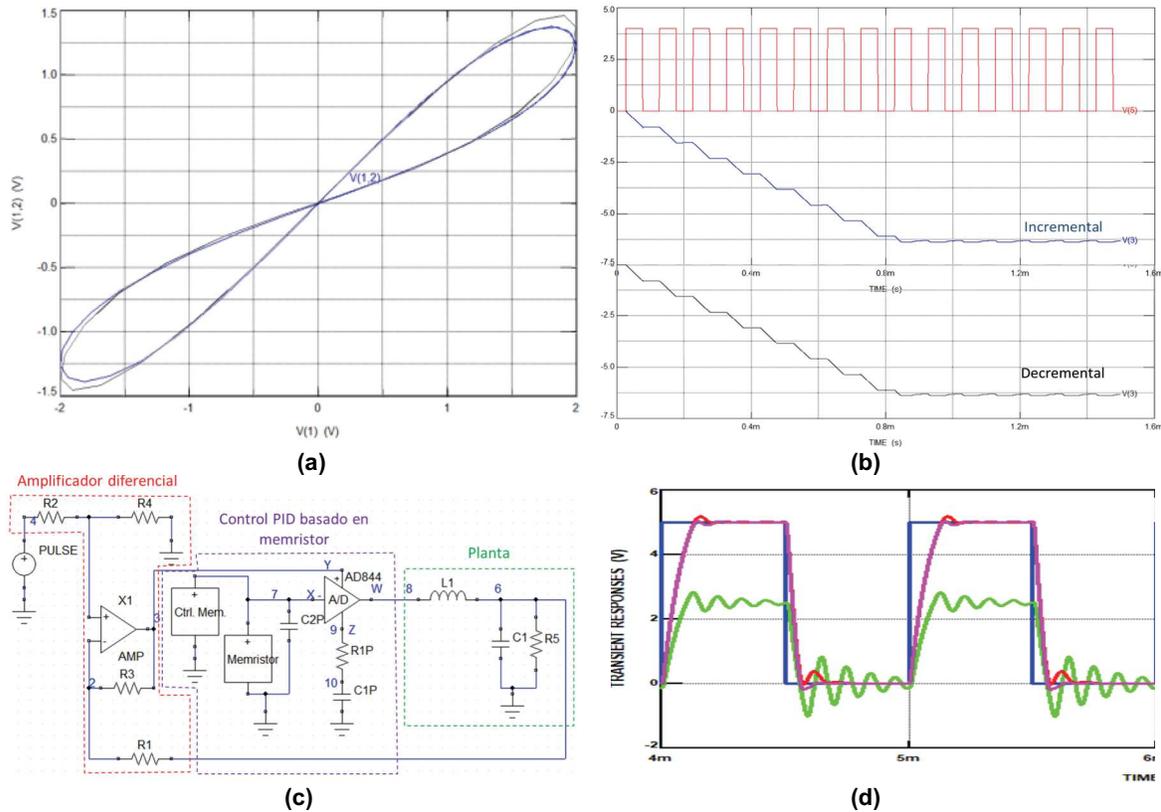


Figura 6. (a) Lazo de histéresis del memductor; (b) No-volatilidad del memductor; (c) Síntesis de la Fig. 4(a) con elementos discretos; (d) Respuesta transitoria de la planta con controlador PID y memductor.

### 5.2 Planta con realimentación unitaria y control PID con parámetros fijos.

En un segundo paso, la Fig. 2(b) es sintetizada con amplificadores operacionales y usando el CFOA para diseñar el controlador PID bosquejado en la Fig. 2(a), como se ilustra en la Fig. 5(c). Aplicando nuevamente el pulso de señal descrito en la subsección 5.1, se obtiene la respuesta transitoria de la planta controlada e ilustrado en la Fig. 5(d) (línea roja). Aquí se observa que el  $t_s$  y  $t_b$  no son simétricos, contradiciendo el pronóstico obtenido en la sección 2. Además, como se había previamente comentado, el  $t_s$  y  $t_b$  no pueden ser reconfigurados en línea, ya que el controlador PID utiliza parámetros fijos. Por otra parte, comparando la forma de onda de la Fig. 2(c) (línea azul) con la de la Fig. 5(c) (línea roja), se observa que la primera no muestra sobre tiros, mientras que la segunda si genera sobretiros en el pulso de 5V y 0V. Es importante mencionar que ajustando los parámetros del controlador PID, es posible minimizar los sobretiros presentados en la Fig. 5(d), sin embargo, debe cuidarse que el sistema a controlar se mantenga en la región estable, caso contrario el sistema tiende a generar sobre tiros más altos y finalmente oscila [1]-[2].

### 5.3 Memductor.

En un tercer paso, la topología del memductor ilustrado en la Fig. 3(a) es simulada en SPICE y los resultados se muestran en la Fig. 6(a) (línea azul). Es importante destacar que para este circuito, el valor de  $R_m=9k\Omega$  fue actualizado en SIMULINK con el objetivo de acoplar los dos lazos de histéresis, corroborando nuevamente los errores que se incluyen en un modelo ideal. Por otro lado, la Fig. 6(b) muestra la propiedad de no-volatilidad del memductor configurado en modo incremental y decremental y se observa que cuando la amplitud del pulso es 0V, la memductancia es “congelada”. Note también que, si los pulsos positivos y negativos son inifnitamente aplicados, la memductancia llega a un limite

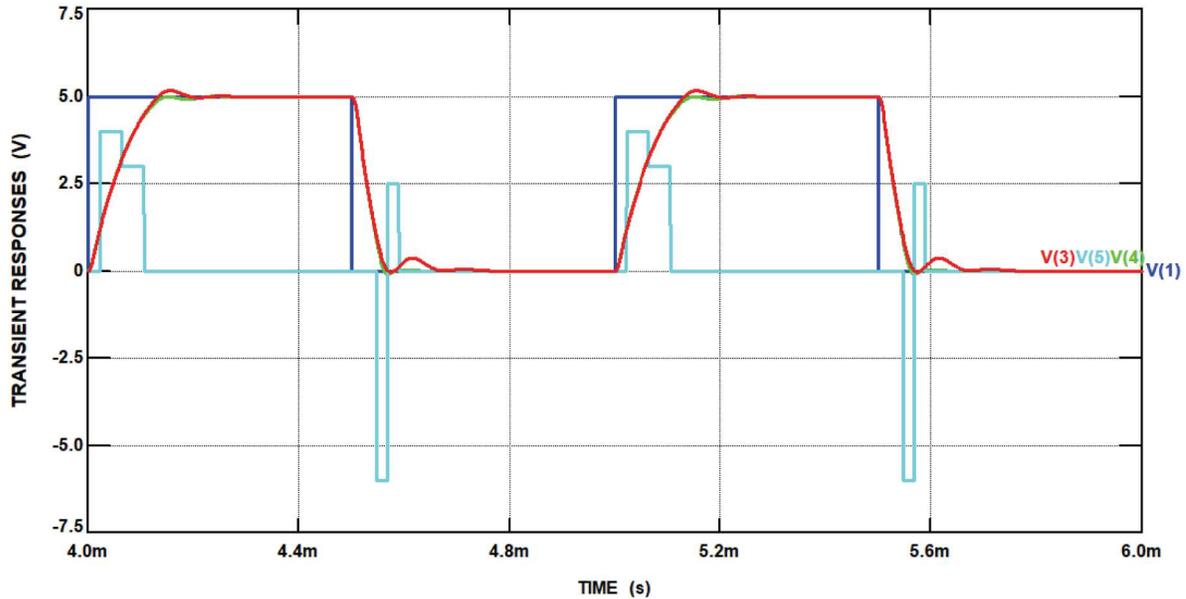


Figura 7. Respuesta transitoria de la planta con controlador PID y memductor (línea verde) y pulsos de control utilizados para variar la memductancia (línea azul cielo).

superior e inferior, y esta no puede aumentar o disminuir arriba de estos límites. Este comportamiento no sucede en un modelo ideal.

#### 5.4 Planta con realimentación unitaria y control PID+memductor.

La Fig. 6(c) ilustra la síntesis de la Fig. 4(a) usando elementos discretos. Aplicando otra vez el pulso de señal descrito en la subsección 5.1, se obtiene la respuesta en el dominio del tiempo de la planta controlada por el PID y usando el memductor, como se muestra en la Fig. 6(d) (línea morada). A diferencia de la subsección 5.2, en este tipo de controlador, el  $t_s$  y  $t_b$  pueden ser reconfigurados en línea y como una consecuencia, los sobretiros pueden minimizarse. En este sentido, la metodología utilizada para la generación de los pulsos y controlar la memductancia, es a prueba y error, ya que la variación de la memductancia depende de la amplitud y ancho del pulso de control. Actualmente para este caso, no existe ninguna metodología de generación automática de pulsos. Por otro lado, el bloque de control del memductor mostrado en la Fig. 6(a) es un simple convertidor de voltaje a corriente, y esta última se inyecta en el memductor con el objetivo de variar la memductancia a conveniencia. Comparando las formas de onda de la Fig. 6(c) generadas por el controlador PID con parámetros fijos (línea roja) y por el controlador PID-memductor (línea morada), se observa una mejor respuesta cuando se utiliza el control propuesto. Finalmente, la Fig. 7 ilustra los pulsos usados para la variación de la memductancia junto con las respuestas transitorias de la planta con controlador PID con parámetros fijos y controlador PID con parámetros reconfigurables, mostrando las ventajas de la propuesta.

Por otro lado, durante el diseño de todos los circuitos, los valores numéricos de los resistores y capacitores fueron seleccionados de tal forma que estén disponibles comercialmente. No obstante, para lograr un mejor desempeño, las tolerancias de los elementos discretos deben ser de por lo menos  $\pm 1\%$  y para algunos de ellos, es necesario el uso de potenciómetros de precisión, en el contexto de un diseño físico. En este sentido y porque el PID con memristor está operando en baja frecuencia, se estima que no debe existir ningún inconveniente durante las pruebas experimentales, ya que siempre es posible compensar la respuesta del sistema a través del uso de potenciómetros. Sin embargo, si el diseño es empujado a trabajar a más altas frecuencias, indudablemente los elementos parásitos presentes en las terminales de entrada y salida de cada circuito integrado y de la misma tarjeta de pruebas, llegan a ser importantes y entonces, nuevas técnicas de compensación deben ser utilizadas con el fin de obtener un buen desempeño del controlador propuesto.



## 6. Conclusiones

El análisis, diseño y simulaciones numéricas de un controlador PID reconfigurable, que hace uso de un memductor controlado por carga ha sido presentado. Básicamente, el memductor esta reemplazando un resistor discreto dentro de un controlador PID con parámetros fijos y de esta forma, obteniendo un controlador PID con parámetros reconfigurables. Como una consecuencia, el  $t_s$  y  $t_b$  de la respuesta transitoria de la planta controlada, pueden ser independientemente reconfigurados con el memductor y como se observo, se obtiene un mejor control del sistema, ya que sobretiros pueden ser minimizados a conveniencia. Simulaciones numéricas realizadas en SIMULINK fueron mostradas para predecir el comportamiento ideal del sistema de control. Posteriormente, simulaciones en SPICE fueron realizadas para pronosticar un comportamiento más real del sistema de control propuesto.

## Agradecimientos

Este trabajo fue soportado en parte por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, con el numero de subvención 222843; en parte por la Universidad Autonoma de Tlaxcala, con el numero de subvención CACyPI-UATx-2017; y en parte por el Programa de Fortalecimiento de la Calidad en Instituciones Educativas con el numero de subvención C/PFCE-2016-29MSU0013Y-07-23. El primer autor agradece a la Asociación Mexicana de Ciencias por el apoyo otorgado durante el XXVII Verano Científico 2017.

## Referencias

- [1] Ziegler J.G., N B. Nichols N.B. "Optimum Settings for Automatic Controllers", Trans. ASME, vol. 64, no. 1, pp. 759-768, Nov. 1942.
- [2] Cohen G.H., Coon G.A. "Theoretical consideration of retarded control", Trans. ASME, vol. 75, no. 1, pp. 827-834, 1953.
- [3] Fereidouni A., Masoum M.A.S., Moghbel, M. "A new adaptive configuration of PID type fuzzy logic controller", ISA Trans., vol. 56, no. 1, pp. 222-240, May 2015.
- [4] Wu X., Qin G., Yu H., Gao S., Liu L., Xue Y. "Using improved chaotic and swarm to tune PID controller on cooperative adaptive cruise control", Optik, vol. 127, no. 6, pp. 3445-3450, Mar. 2016
- [5] Moharam, A., El-Hosseini M.A., Ali H.A. "Design of optimal PID controller using hybrid differential evolution and particle swarm optimization with an aging leader and challengers", Appl. Soft Comput., vol. 38, no. 1, pp. 727-737, Jan. 2016.
- [6] Chua L.O. "Memristor: The missing circuit element", IEEE Trans. Circuit Theory, vol. CT-18, no. 5, pp. 507-519, Sep. 1971.
- [7] Chua L.O., Kang S.M. "Memristive devices and systems", Proc. IEEE, vol 64, no. 2, pp. 209-223, Feb. 1976.
- [8] Sánchez-López, Carrasco-Aguilar M.A., Muñiz-Montero C. "A 16 Hz-160 kHz memristor emulator circuit", Int. J. Electron Commun., vol. 61, no. 5, pp. 1-12, Jun. 2015.
- [9] Sánchez-López C., Aguila-Cuapio L.E. "A 860 kHz Grounded Memristor Emulator Circuit", AEU Int. J. Electron. Commun. vol. 73, no. 1, pp. 23-33, Mar. 2017.
- [10] Sánchez-López C., Ruiz-Pastor A., Ochoa-Montiel R., Carrasco-Aguilar M.A. "Symbolic Nodal Analysis of Analog Circuits with Modern Multiport Functional Blocks", RadioEng., vol. 22, no. 2, pp. 518-525, Jun. 2013.





# Análisis dinámico y estático de un robot móvil sometido a una fuerza externa de repulsión

Orozco Magdaleno Ernesto Christian, Castillo Castañeda Eduardo, Mecalco Gutiérrez María Erika, Chaparro Rico Betsy Dayana Marcela, Jiménez Díaz Gilberto.

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Querétaro, Instituto Politécnico Nacional, CICATA-IPN-QRO

## Resumen

*El análisis de las fuerzas que actúan en un robot es fundamental para su correcto diseño mecánico, y posterior puesta en funcionamiento. En este artículo se presenta el análisis dinámico y estático de un robot móvil, compuesto de una base móvil y un sistema pan-tilt montado sobre él, que se encuentra sometido a una fuerza externa de repulsión. El modelo dinámico del sistema se obtiene mediante la formulación de Newton-Euler a partir del análisis de las fuerzas internas y externas que actúan en él, considerando que la base móvil se encuentra estática y el sistema pan-tilt en movimiento, soportando la fuerza externa de repulsión. El equilibrio estático del robot se obtiene bajo el principio de D'Alembert, permitiendo que el robot no volqué por acción de la fuerza externa. Una simulación en SolidWorks permite validar el análisis dinámico propuesto. Los análisis y simulaciones presentados en este artículo son válidos para la configuración y modo de operación del robot móvil propuesto.*

**Palabras clave:** Robot móvil, análisis estático, análisis dinámico, fuerza externa, fuerza de repulsión.

## 1. Introducción

El desarrollo de robots móviles responde a la necesidad de ampliar o mejorar el campo de aplicación de la robótica, restringido inicialmente al alcance de una estructura mecánica anclada desde uno de sus extremos. Los vehículos con ruedas resultan la solución más simple y eficiente para conseguir la movilidad necesaria en terrenos suficientemente duros y libres de obstáculos, pudiendo obtener velocidades relativamente altas [1].

En la actualidad las necesidades, en la robótica industrial y de servicios, han permitido el surgimiento o desarrollo de nuevos robots móviles con ruedas que incorporan un brazo manipulador en su parte superior. Esto les permite trabajar en diferentes aplicaciones, como soldar, pintar, limpiar a alta presión, o inspeccionar en lugares de difícil acceso [1][2][3][4].

El desarrollo de estos robots a nivel laboratorio, como el "Little Helper" en [5] de la Universidad de Aalborg, el "Multilink Manipulator" presentado en [6], o el robot para una línea mecatrónica de ensamble/desensamble en [7], permite que realicen básicamente cualquier tarea que su movilidad y espacio de trabajo les permiten. En un nivel comercial se encuentra el robot RB-1 de Robotnik, el cual está diseñado para desarrollar tareas dentro de interiores [8].

Las aplicaciones que desarrollan este tipo de robots demandan que el robot se mueva con cierta velocidad y aceleración, y que además sean capaces de resistir la interacción con fuerzas externas derivadas del medio en el que operan [9]. Es por esto, que el análisis dinámico y estático del robot juegan un papel importante en el diseño mecánico del mismo, evitando que el robot volqué por acción de una fuerza externa.

En el modelado dinámico de un robot existen dos tipos de análisis, el problema dinámico directo y el problema dinámico inverso. El problema dinámico inverso, que es el de interés, permite conocer el torque o par torsión de los motores requerido para que el robot pueda desarrollar una trayectoria, basándose en la masa, posiciones, velocidades, y aceleraciones del robot, así como las fuerzas internas y externas que interactúan en él [9][10].

El problema dinámico inverso se soluciona formulando las ecuaciones de movimiento dinámico del robot, estas ecuaciones se pueden formular por diferentes métodos, como la formulación iterativa de Newton-Euler, Euler-Lagrange o el método de Kane [9][10][11].

El análisis estático de un robot o cualquier otra estructura mecánica se puede desarrollar mediante un diagrama de cuerpo libre, y aplicando el principio del equilibrio de fuerzas de un cuerpo rígido de D'Alembert, o la segunda Ley de Newton. Este análisis permite observar las fuerzas y momentos que se generan en el robot cuando se encuentra estático y sometido a una fuerza externa de repulsión [9][10][12].

Este trabajo propone analizar un robot móvil de tres ruedas con tracción diferencial que tenga integrado en su parte superior un sistema de dos grados de libertad, sistema pan-tilt. En base a su modo de operación, el cual consiste en operar el sistema pan-tilt mientras que la base móvil permanece estática y operar la base móvil mientras que el sistema pan-tilt permanece estático, se presenta el análisis dinámico del sistema pan-tilt sometido a una fuerza de repulsión externa de 10 N, y el análisis estático del sistema mecánico del robot para evitar una volcadura por reacción de la fuerza externa. Finalmente se presenta una simulación en SolidWorks® para validar el modelo dinámico.

## 2. Descripción de la configuración

El robot móvil cuenta con una base móvil de tres ruedas, con tracción diferencial, y un sistema pan-tilt montado en su parte superior, figura 1. Este diseño es propuesto para poder montar o posicionar una herramienta de trabajo (para soldar, pintar, limpiar, inspeccionar, etc.) como efector final en el sistema de dos grados de libertad; lo cual permite tener un área de trabajo esférica del robot.

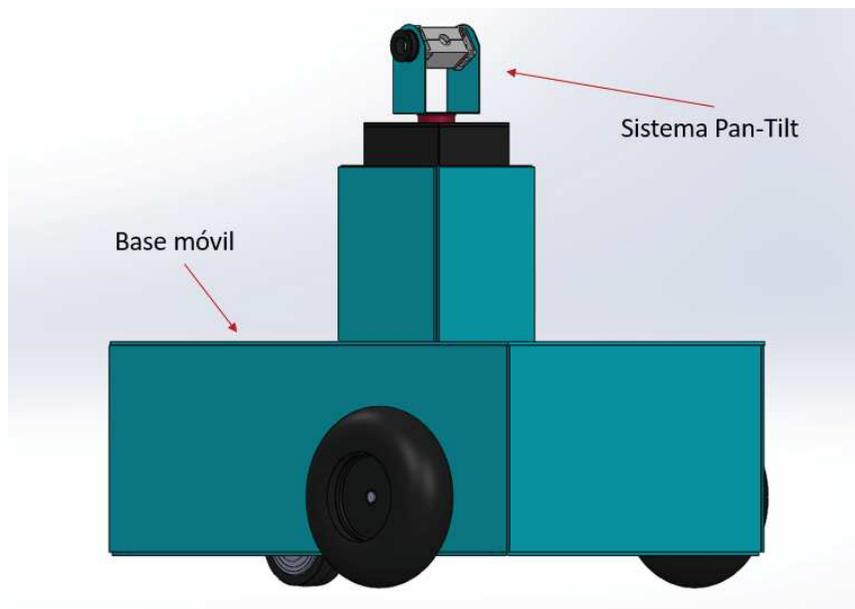


Figura 1. Robot móvil propuesto.

La configuración propuesta delimita la movilidad del sistema pan-tilt a un giro de  $180^\circ$  en el ángulo Yaw y un giro de  $90^\circ$  en el ángulo Pitch, figura 2 [13]. Por lo anterior el robot cuenta con un espacio de trabajo de un cuarto de esfera, figura 3, el cual se puede desplazar o mover a cualquier parte que la base móvil y las dimensiones del robot le permitan.

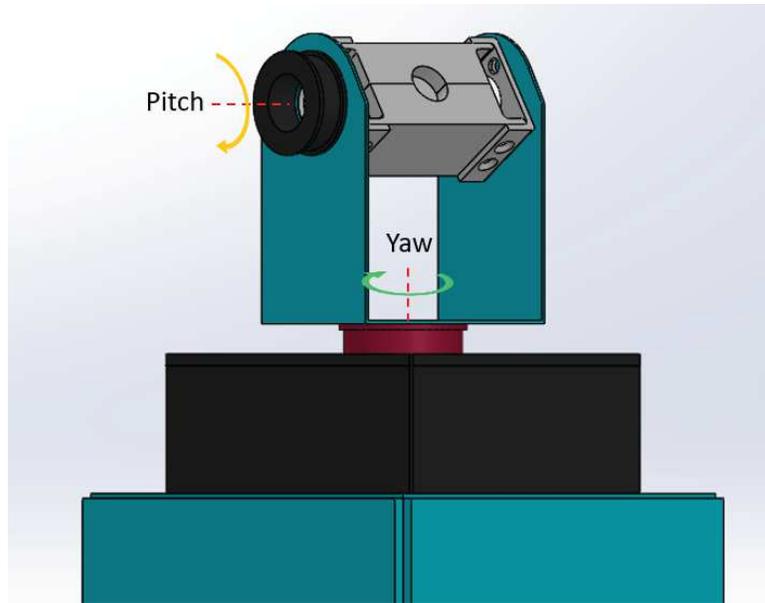


Figura 2. Ángulos de giro del sistema pan-tilt.

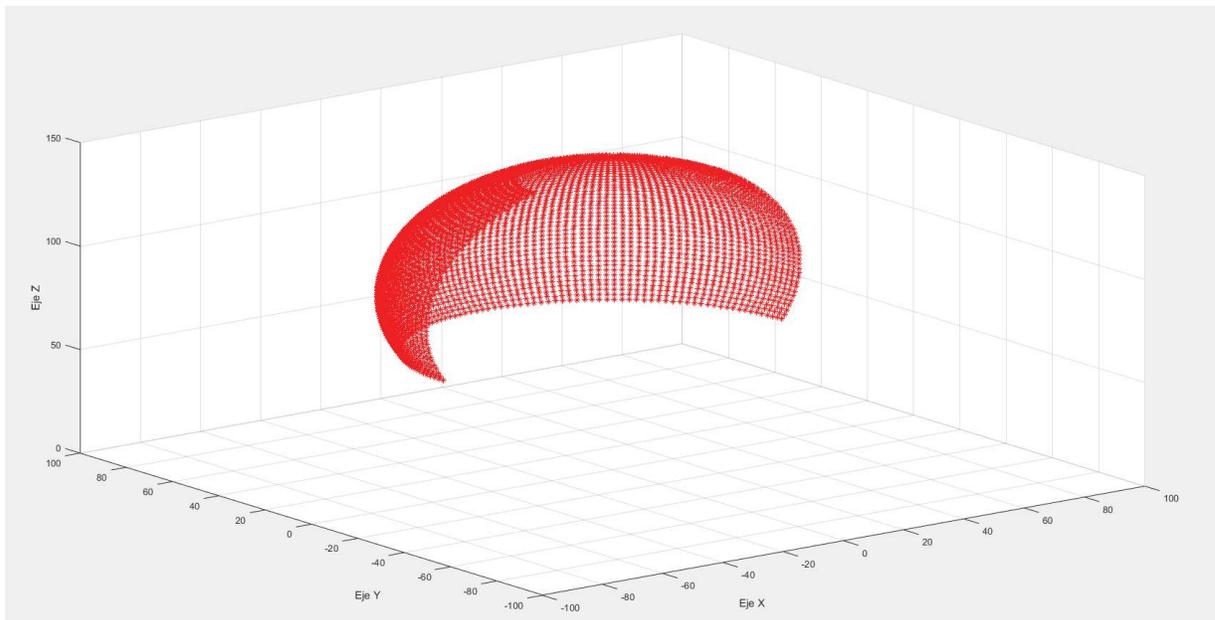


Figura 3. Espacio de trabajo para un giro de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  en Yaw y de  $-25^\circ$  a  $65^\circ$  en Pitch.

El tamaño del espacio de trabajo del robot puede variar en base a las dimensiones del robot, es decir, puede ampliarse o reducirse.

Finalmente, se puede observar que el sistema pan-tilt se posiciona en medio de la base móvil, ya que de acuerdo con [14] y [15], si el centro de gravedad de un robot móvil con tres ruedas se posiciona en el centro del triángulo formado por el contacto de las tres ruedas con el suelo, se garantiza la estabilidad estática del robot, mediante un soporte de tipo trípode, figura 4.

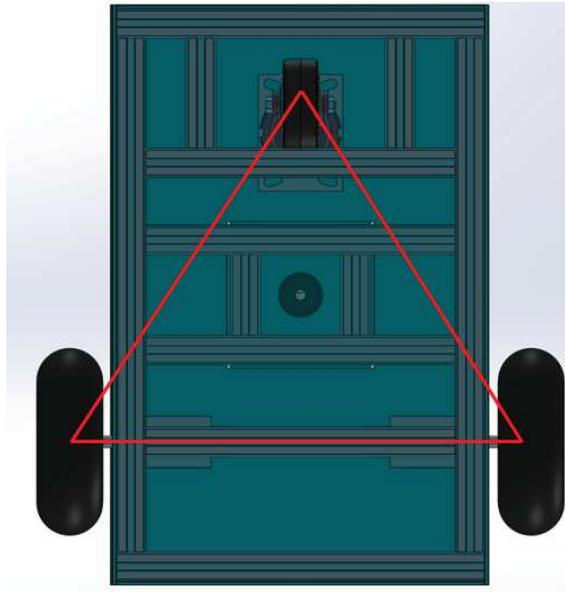


Figura 4. Soporte tipo trípode.

### 3. Análisis estático

Considerando la movilidad y la amplitud de los grados de libertad del sistema pan-tilt, el caso crítico para volcadura es cuando Pitch se encuentra en  $0^\circ$  y Yaw en  $0^\circ$  o  $180^\circ$ , figura 5, ya que es cuando la fuerza externa de repulsión impacta directamente sobre el robot sin la descomposición de la fuerza en diferentes ejes.

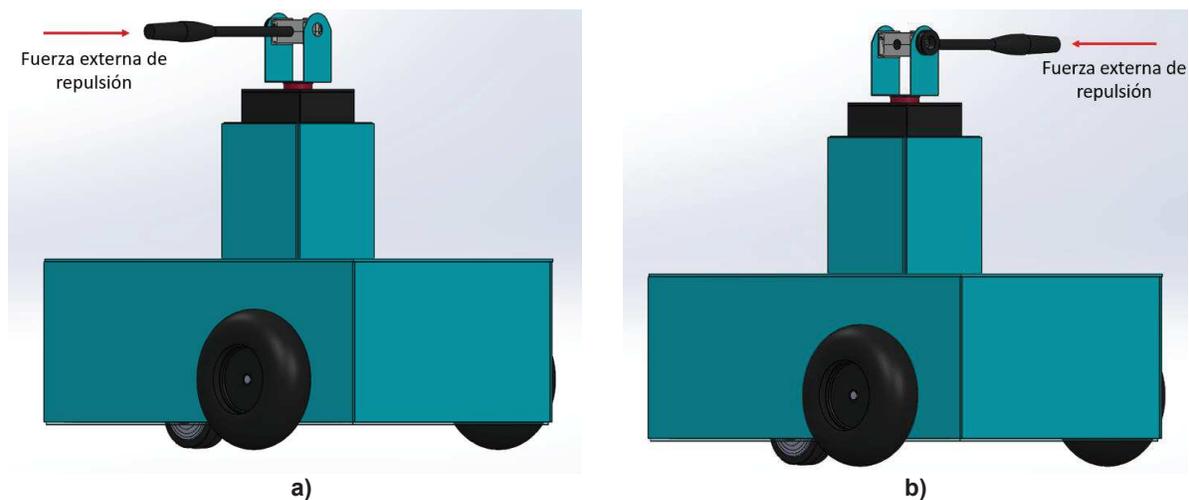


Figura 5. Posición crítica para volcadura en reacción a una fuerza externa de repulsión: a) Pitch  $0^\circ$  y Yaw  $0^\circ$ , b) Pitch  $0^\circ$  y Yaw  $180^\circ$ .



En la figura 5 se observa una herramienta de trabajo para una aplicación no en específico, ya sea para soldar, pintar o limpiar a alta presión, la cual se considera para el análisis estático.

Se emplea un diagrama de cuerpo libre, donde el centro de masa de la herramienta de trabajo se posiciona en el centro del eje de rotación del ángulo Pitch, permitiendo que no se generen momentos por acción del centro de gravedad. En el diagrama de cuerpo libre se observa de manera general cómo se encuentran distribuidas las fuerzas de acción y reacción del robot móvil, y cómo actúa la fuerza externa de repulsión, figura 6.

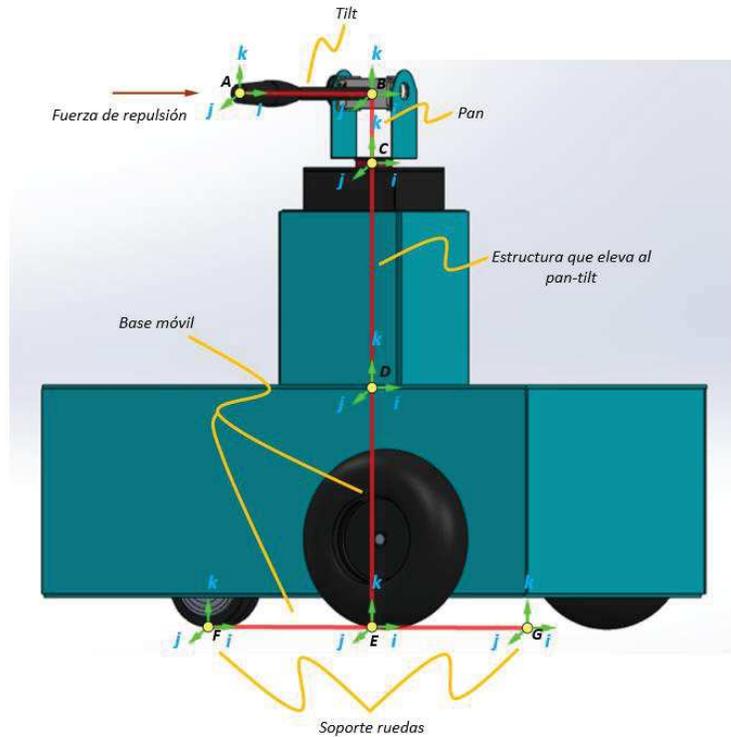


Figura 6. Diagrama de cuerpo libre de la estructura general del robot móvil.

Las fuerzas de acción y reacción, y momentos de cada parte del sistema estático se observan en las figuras 7 a 11.

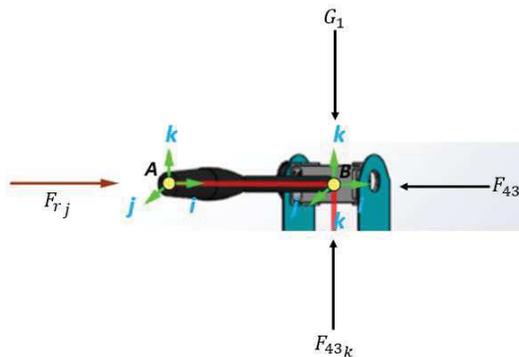


Figura 7. Fuerzas de acción y reacción en el sistema *pan-tilt*.

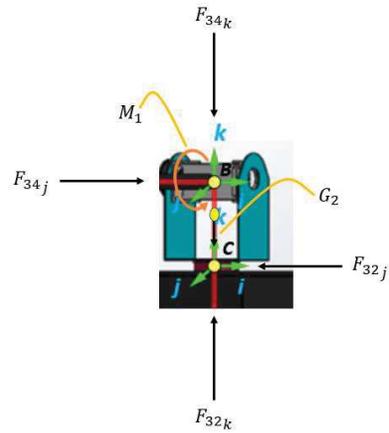


Figura 8. Fuerzas de acción, reacción y momentos en el sistema *pan-tilt*.

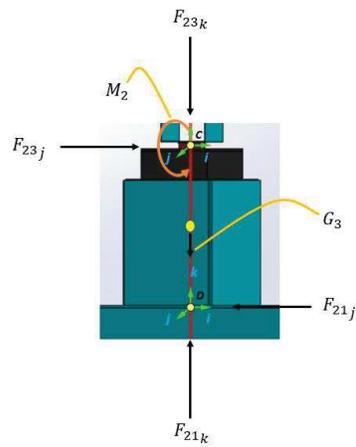


Figura 9. Fuerzas de acción, reacción y momentos en la estructura que eleva el *pan-tilt*.

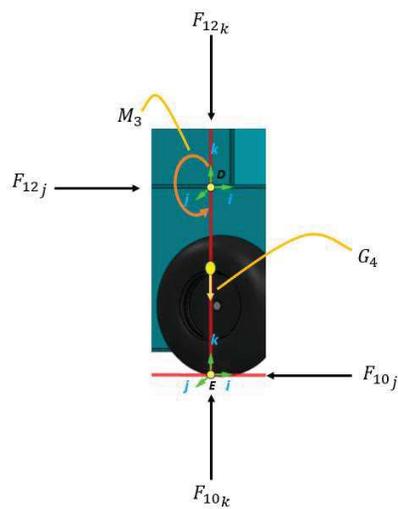
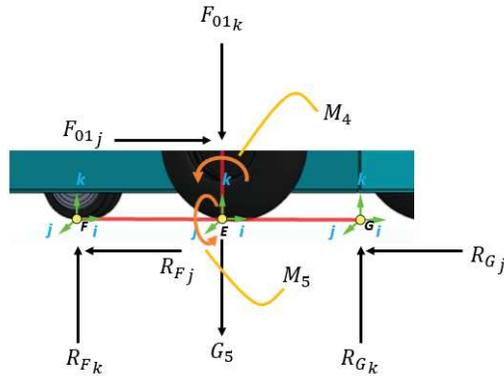


Figura 10. Fuerzas de acción, reacción y momentos en la base móvil, parte superior.



**Figura 11. Fuerzas de acción, reacción y momentos en la base móvil, parte inferior.**

De la figura 7 se obtienen las ecuaciones 1 a 4, donde se emplea el principio del equilibrio estático de D'Alembert:

$$\sum F_i = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_j = F_{43j} - F_{ij} = 0 \quad (2)$$

$$\sum F_k = F_{43k} - G_1 = 0 \quad (3)$$

$$\sum M = 0 \quad (4)$$

donde  $F_{43j}$  y  $F_{43k}$  son las fuerzas de reacción a  $F_{ij}$  y  $G_1$  respectivamente.  $G_1$ , así como todas las fuerzas  $G$ , es el peso propio de la pieza o parte analizada, es decir, el producto de su masa por la constante gravitacional.

Las ecuaciones 5 a 8 se obtienen de la figura 8:

$$\sum F_i = 0 \quad (5)$$

$$\sum F_j = F_{32j} - F_{34j} = 0 \quad (6)$$

$$\sum F_k = F_{32k} - F_{34k} - G_2 = 0 \quad (7)$$

$$\sum M = M_1 - F_{34j}BC = 0 \quad (8)$$

donde BC es la distancia del punto B al punto C.

Las ecuaciones 9 a 12 se obtienen de la figura 9:

$$\sum F_i = 0 \quad (9)$$

$$\sum F_j = F_{21j} - F_{23j} = 0 \quad (10)$$

$$\sum F_k = F_{21k} - F_{23k} - G_3 = 0 \quad (11)$$

$$\sum M = M_2 - F_{23j}CD = 0 \quad (12)$$



De la figura 10 se obtienen las ecuaciones 13 a 16:

$$\sum F_i = 0 \quad (13)$$

$$\sum F_j = F_{10j} - F_{12j} = 0 \quad (14)$$

$$\sum F_k = F_{10k} - F_{12k} - G_4 = 0 \quad (15)$$

$$\sum M = M_3 - F_{12j}DE = 0 \quad (16)$$

De la figura 11 se obtienen las ecuaciones 17 a 21:

$$\sum F_i = 0 \quad (17)$$

$$\sum F_j = R_{Fj} + R_{Gj} - F_{01j} = 0 \quad (18)$$

$$\sum F_k = R_{Fk} + R_{Gk} - F_{01k} - G_5 = 0 \quad (19)$$

$$\sum M_k = M_4 + R_{Gk}FG - G_5FE = 0 \quad (20)$$

$$\sum M_j = M_5 + R_{Gj}FG = 0 \quad (21)$$

donde las fuerzas de reacción  $R_F$  y  $R_G$  permiten que la base móvil no se volqué y se mantenga en equilibrio estático. En base a estas fuerzas se determina la masa final de la parte inferior de la base móvil. La parte inferior de la base móvil tiene un comportamiento de viga doblemente empotrada.

En base a los datos de la tabla 1 se desarrollan las ecuaciones 1 a 21, obteniendo los datos de la tabla 2.

**Tabla 1. Datos de dimensiones y pesos del robot móvil.**

Longitud	(m)	Peso	(N)
AB	0.6	G1	8.0442
BC	0.135	G2	6.8670
CD	0.27	G3	29.43
DE	0.35	G4	19.62
FG	0.52	G5	39.24

**Tabla 2. Datos de las fuerzas de reacción y momentos obtenidos.**

Fuerza	(N)	Fuerza	(N)	Fuerza	(N)	Fuerza	(N)	Fuerza	(N)
F43j	10	F34k	-8.0442	F21k	30.6072	F10k	-10.9872	F01k	10.9872
F43k	8.0442	M1	-1.35	M2	2.7	M3	-3.5	RFk	25.1136
F32j	-10	F23j	10	F12j	-10	F01j	10	RGk	25.1136
F34j	-10	F21j	10	F10j	-10	RFj	5	M4	-2.8567
F32k	-1.1772	F23k	1.1772	F12k	30.6072	RGj	5	M5	-2.6



De la tabla 2 se obtienen las expresiones 22 y 23. Se puede observar que el peso de la base móvil total es mayor a la fuerza que reacciona en el eje  $j$ , por lo que la fuerza no podrá volcar al robot móvil.

$$\sum F_{BM_j} = |F_{10j} + R_{Fj} + R_{Gj}| = 20 \quad (22)$$

$$\sum G_{BM} = |G_4 + G_5| = 58.86 \quad (23)$$

#### 4. Análisis dinámico

Antes de iniciar el análisis dinámico inverso del sistema pan-tilt, se obtiene primero su Modelo Geométrico Directo (MGD), y se genera la trayectoria a seguir por la herramienta de trabajo.

##### 4.1 Modelo Geométrico Directo (MGD)

Mediante la convención de Denavit-Hartenberg descrita en [9], se obtienen los parámetros del sistema pan-tilt de la tabla 3, basados en la asignación de ejes de coordenadas de la figura 12.

Tabla 3. Parámetros Denavit-Hartenberg del sistema pan-tilt.

$i$	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	$l_1$	0
2	90	0	$l_2$	$\theta_1$
3	0	$l_3$	0	$\theta_2$

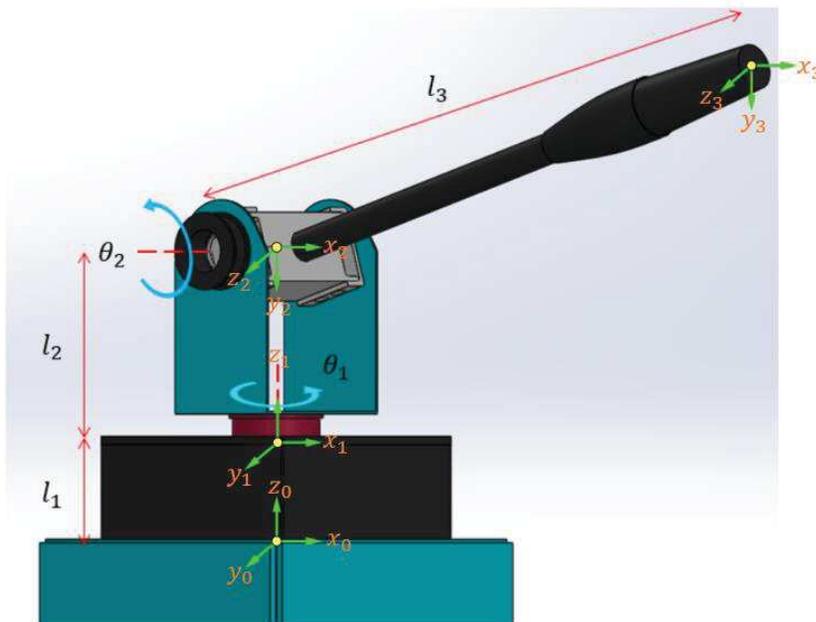


Figura 12. Asignación de sistema de coordenadas.



En la expresión 24 se muestra la matriz de transformación homogénea obtenida con los parámetros de Denavit-Hartenberg del sistema pan-tilt.

$${}^1A_3 = \begin{bmatrix} C\theta_2 C\theta_3 & -C\theta_2 S\theta_3 & S\theta_2 & a_3 C\theta_2 C\theta_3 \\ C\theta_3 S\theta_2 & -S\theta_3 S\theta_2 & -C\theta_2 & a_3 C\theta_3 S\theta_2 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & d_1 + d_2 + a_3 S\theta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Empleando el vector de puntos de la matriz anterior, se genera la trayectoria que sigue la herramienta de trabajo, figura 13. Esta trayectoria está compuesta por un movimiento de 0° a 180° de  $\theta_2$  con un valor fijo de 65° en  $\theta_3$ , línea roja superior; por un movimiento de 65° a 25° de  $\theta_3$  con un valor fijo de 180° en  $\theta_2$ , línea azul izquierda; por un movimiento de 180° a 0° de  $\theta_2$  con un valor fijo de 25° en  $\theta_3$ , línea roja inferior; y por un movimiento de 25° a 65° de  $\theta_3$  con un valor fijo de 0° en  $\theta_2$ , línea azul derecha.

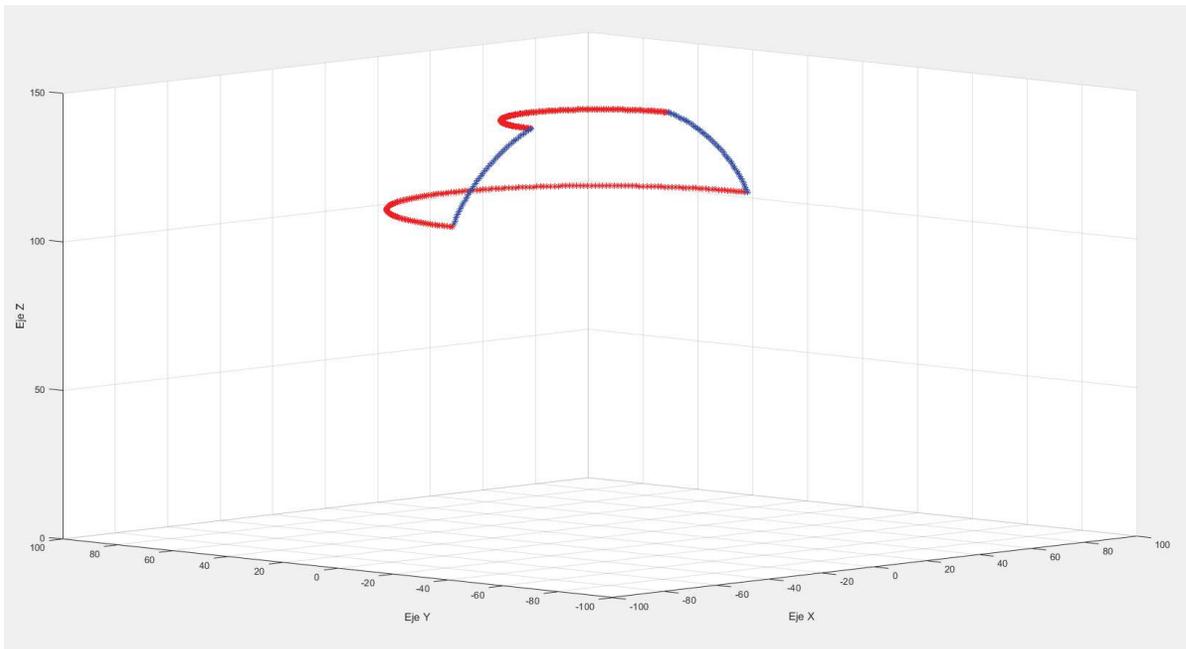


Figura 13. Trayectoria de la herramienta de trabajo.

## 4.2 Análisis dinámico inverso

Se emplea la formulación dinámica iterativa de Newton-Euler, ecuaciones 25 a 33, donde se definen las iteraciones salientes; posiciones, velocidades y aceleraciones angulares y lineales, y las fuerzas internas que interactúan en el sistema pan-tilt. Así como las iteraciones entrantes, la fuerza externa de repulsión y los pares torsionales.

$${}^{i+1}w_{i+1} = {}^{i+1}R^i w_i + \dot{\theta}_{i+1} \hat{Z}_{i+1} \quad (25)$$



$${}^{i+1}\dot{\mathbf{w}}_{i+1} = {}^{i+1}\mathbf{R}^i \dot{\mathbf{w}}_i + {}^{i+1}\mathbf{R}^i \mathbf{w}_i \times \dot{\theta}_{i+1} \hat{\mathbf{Z}}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} \hat{\mathbf{Z}}_{i+1} \quad (26)$$

$${}^{i+1}\dot{\mathbf{v}}_{i+1} = {}^{i+1}\mathbf{R}^i (\dot{\mathbf{w}}_i \times {}^i\mathbf{P}_{i+1} + \mathbf{w}_i \times ({}^i\mathbf{w}_i \times {}^i\mathbf{P}_{i+1})) + {}^i\dot{\mathbf{v}}_i \quad (27)$$

$${}^{i+1}\dot{\mathbf{v}}_{C_{i+1}} = {}^{i+1}\dot{\mathbf{w}}_{i+1} \times {}^{i+1}\mathbf{P}_{C_{i+1}} + \mathbf{w}_{i+1} \times ({}^{i+1}\mathbf{w}_{i+1} \times {}^{i+1}\mathbf{P}_{C_{i+1}}) + {}^i\dot{\mathbf{v}}_{i+1} \quad (28)$$

$${}^{i+1}\mathbf{F}_{i+1} = \mathbf{m}_{i+1} {}^{i+1}\dot{\mathbf{v}}_{C_{i+1}} \quad (29)$$

$${}^{i+1}\mathbf{N}_{i+1} = {}^{C_{i+1}}\mathbf{I}_{i+1} {}^{i+1}\dot{\mathbf{w}}_{i+1} + \mathbf{w}_{i+1} \times {}^{C_{i+1}}\mathbf{I}_{i+1} \mathbf{w}_{i+1} \quad (30)$$

$${}^i\mathbf{f}_i = {}^i\mathbf{R}^{i+1} \mathbf{f}_{i+1} + {}^i\mathbf{F}_i \quad (31)$$

$${}^i\mathbf{n}_i = {}^i\mathbf{N}_{i+1} + {}^i\mathbf{R}^{i+1} \mathbf{n}_{i+1} + {}^i\mathbf{P}_{C_i} \times {}^i\mathbf{F}_i + {}^i\mathbf{P}_{i+1} \times {}^i\mathbf{R}^{i+1} \mathbf{f}_{i+1} \quad (32)$$

$$\boldsymbol{\tau}_i = {}^i\mathbf{n}_i^T \hat{\mathbf{Z}}_i \quad (33)$$

Se desarrollan las ecuaciones anteriores mediante el uso de MATLAB® para la trayectoria de la figura 13, utilizando las posiciones angulares de la figura 14, y, considerando una velocidad angular de 10°/s y una aceleración angular igual a cero.

El resultado del análisis dinámico inverso se muestra en las figuras 15 y 16. En la figura 15 se presenta el resultado del sistema tilt, en donde se puede observar que debido a que la trayectoria no parte de una posición en reposo, se requiere de un par torsional inicial de 827 N-mm. Se aprecia también que existe un incremento en el par torsional en los instantes en que el motor cambia de posición angular.

En la figura 16 se presenta el resultado del sistema pan, en donde se puede observar que el par torsional requerido en esta articulación, para esta trayectoria, es prácticamente nulo, esto debido a que las fuerzas actúan mayormente de manera axial y no radial, a diferencia del sistema tilt.

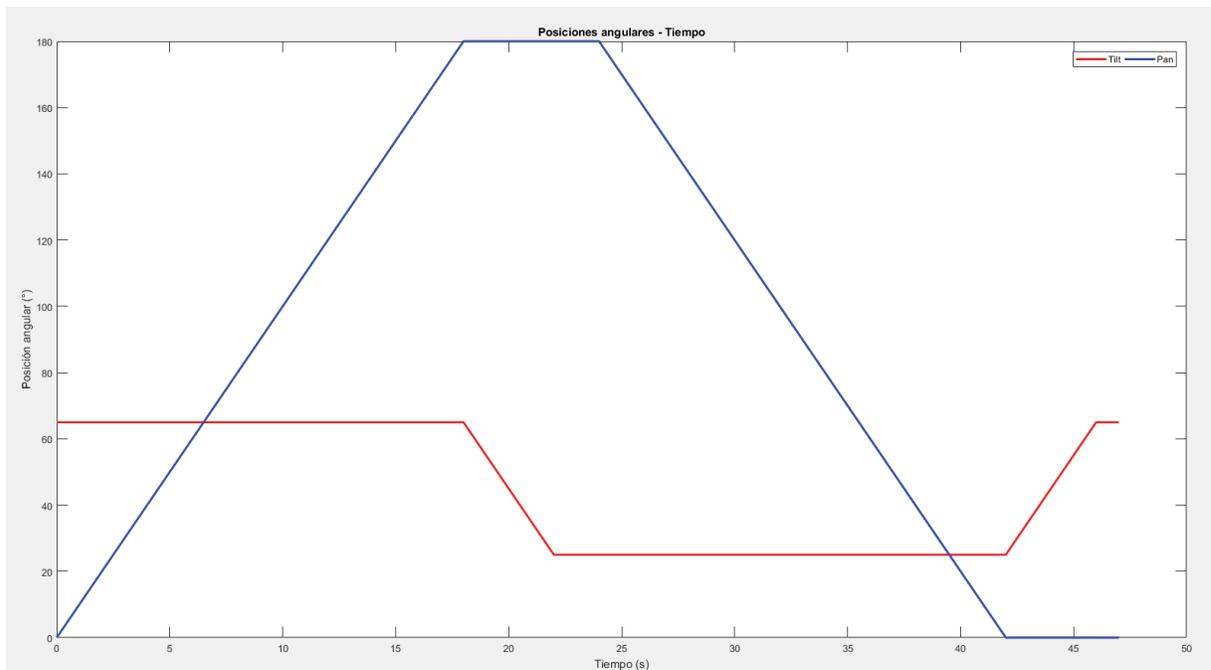


Figura 14. Posiciones angulares del pan-tilt para la trayectoria de trabajo.

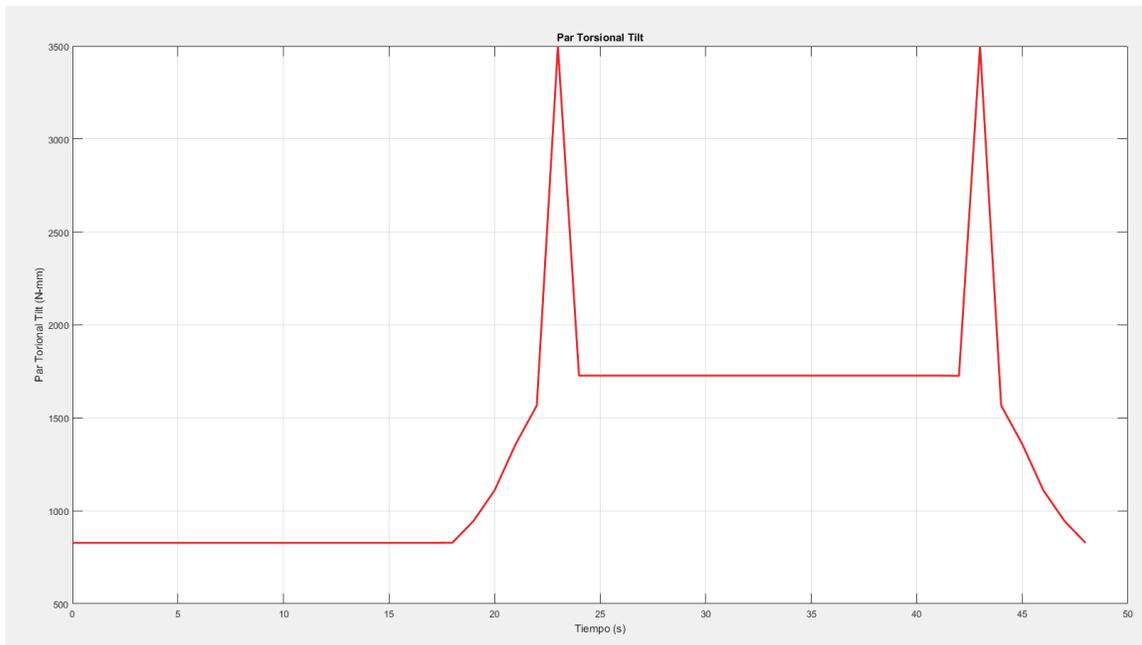


Figura 15. Grafica del par torsional requerido en tilt para realizar la trayectoria de trabajo.

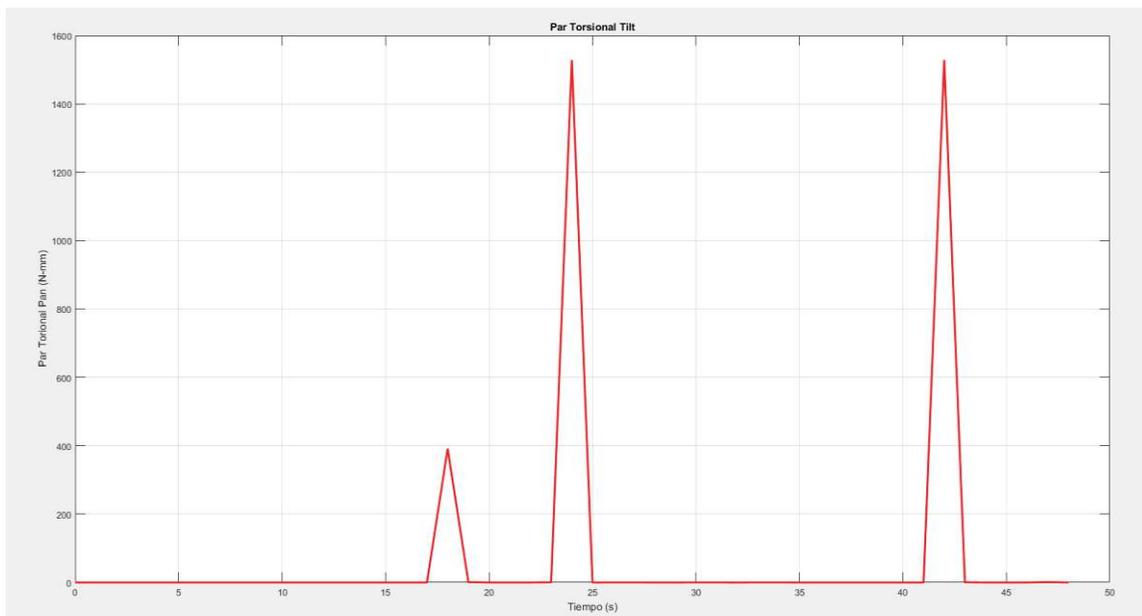


Figura 16. Grafica del par torsional requerido en pan para realizar la trayectoria de trabajo.

### 4.3 Simulación en SolidWorks®

Mediante un análisis de movimiento en SolidWorks® se logra simular el comportamiento de los actuadores del sistema pan-tilt al aplicar una fuerza constante de 10 N, con dirección entrante, en la punta de la herramienta de trabajo. Los resultados de esta simulación se muestran en las figuras 17 y 18.



Se puede apreciar que los resultados obtenidos de la simulación concuerdan con los obtenidos con el modelo dinámico inverso desarrollado.

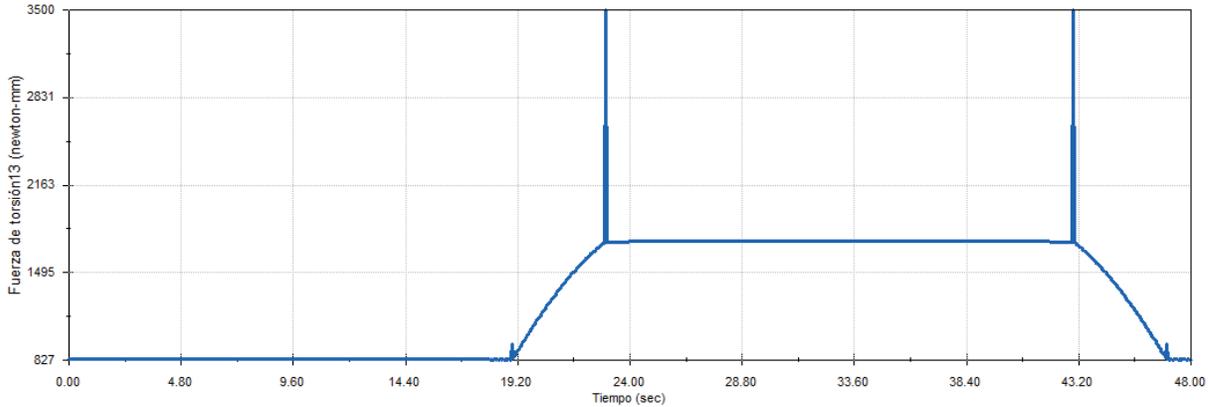


Figura 17. Grafica del par torsional requerido en tilt para realizar la trayectoria de trabajo.

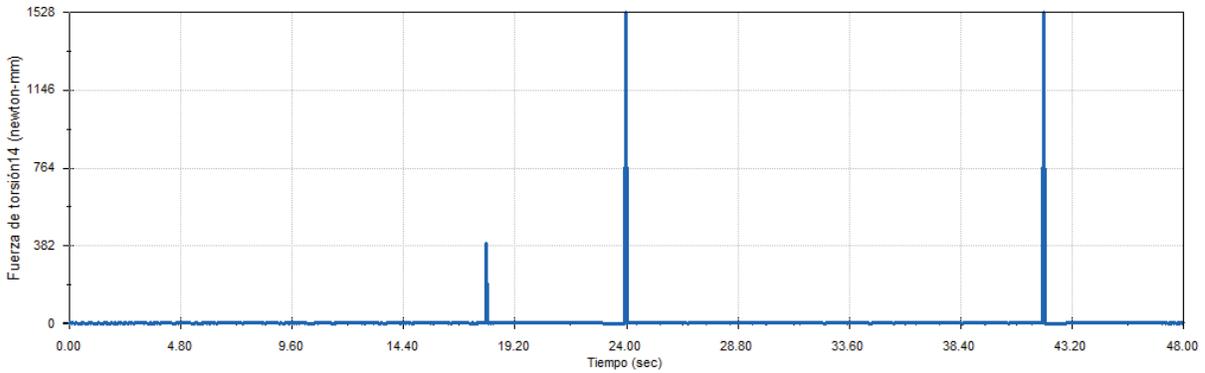


Figura 18. Grafica del par torsional requerido en tilt para realizar la trayectoria de trabajo.

## 5. Conclusión

Este artículo presenta una alternativa en el diseño mecánico, al analizar de manera separada el comportamiento estático y dinámico de un robot manipulador móvil sometido a una fuerza externa de repulsión. El análisis estático de la estructura general del robot permite conocer las fuerzas de acción y reacción derivadas de la fuerza externa de repulsión, pudiendo así conocer el peso mínimo requerido de la estructura para que ésta no volque. El análisis dinámico permite conocer el par torsional mínimo requerido para que el sistema pan-tilt pueda desarrollar la trayectoria de movimiento para una tarea en específico. El análisis estático y dinámico que se presentan son válidos para una tarea en la que la base móvil del robot permanece sin movimiento cuando el sistema pan-tilt se encuentra en movimiento.



## Referencias

- [1] Ollero A. *“Robótica Manipuladores y Robots Móviles”*, Marcombo, España, 1ra. Edición, 2001.
- [2] Friis D. *“Industrial Robots – Definition and Classification”*, *World Robotics 2016 Industrial Robots*, pp. 25-34, 2017.
- [3] Haegele M. *“Introduction into Service Robots”*, *World Robotics 2016 Service Robots*, pp. 8-17, 2017.
- [4] Datta S. *et al.* *“Development of autonomous mobile robot with manipulators for manufacturing environment”*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, No. 38, pp. 536-542, 2007.
- [5] Hvilshøj M. & Bøgh S. *“Little Helper – An Autonomous Industrial Manipulator Concept”*, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Intech, Vol. 8, No. 2, pp. 1-11, 2011.
- [6] Filaretov V. & Katsurin A. *“Development of the System of Telecontrol by the Multilink Manipulator Installed on the Mobile Robot”*, 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, DAAAM, pp. 765-772, Vienna, 2015.
- [7] Minca E. *et al.* *“Modelling and Control of an Assembly/Disassembly Mechatronics Line Served by Mobile Robot with Manipulator”*, *Control Engineering Practice*, Elsevier, No. 31, pp. 50-62, 2014.
- [8] Robotnik, *“RB-1”* [Online], Disponible en: [http://www.robotnik.es/web/wp-content/uploads/2014/06/RB-1\\_Datasheet\\_e.pdf](http://www.robotnik.es/web/wp-content/uploads/2014/06/RB-1_Datasheet_e.pdf).
- [9] Tsai L. *“Robot Analysis”*, John Wiley & Sons, Inc., USA, 1ra. Edición, 1999.
- [10] Marghitu D. B. *“Mechanisms and Robots Analysis with MATLAB®”*, Springer, Inglaterra, 1ra. Edición, 2009.
- [11] Craig J. J. *“Robótica”*, Pearson, México, 3ra. Edición, 2006.
- [12] Beer F. P. *et al.* *“Mecánica Vectorial para Ingenieros Estática”*, Mc Graw Hill, México, 8va. Edición, 2007.
- [13] Barrientos A. *et al.* *“Fundamentos de Robótica”*, Mc Graw Hill, España, 1ra. Edición, 1997.
- [14] Yun X. *“Stability Analysis of the Internal Dynamics of a Wheeled Mobile Robot”*, *Journal of Robotic Systems*. Calhoun, Vol. 14, No. 10, pp. 697-709, 1997.
- [15] Goris K. *“Autonomous Mobile Robot Mechanical Design”*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Bruselas, 2005.



# Sistema de Grabado Láser

Macías González Israel<sup>1</sup>, Almendárez Rodríguez Juan<sup>2</sup>, Ortiz  
Aguilera Omar Fernando<sup>2</sup>, Asesores: Núñez Olvera Oscar  
Fernando<sup>2</sup>, Pedroza Rodríguez Griselda<sup>2</sup>.

Facultad de Ingeniería UASLP<sup>1</sup>, Instituto de Investigación en Comunicación Óptica<sup>2</sup>

## Resumen

*En el presente trabajo se muestra el desarrollo de un sistema de grabado láser que permite crear figuras haciendo uso de una mesa X-Y controlada desde un programa en LabVIEW que permite posicionar un láser que recorre una trayectoria de una imagen adquirida mediante una cámara web o previamente obtenida. La imagen es procesada por el programa a partir del contorno de la figura para generar la trayectoria que habrá de seguir el láser y así recortar o dibujar la imagen en un material de superficie plana como madera, papel o plástico.*

**Palabras clave:** Grabado. Láser. LabVIEW. Vision. Imágenes.

## 1. Introducción

Hoy en día uno de los principales sistemas a automatizarse a sido el corte y el grabado de materia prima. Actualmente el uso de máquinas-herramientas para la producción en masa ha estado ganando lugar en el sector industrial del país, sin embargo el uso de máquinas convencionales no ha desaparecido totalmente en el área de manufactura. El sistema de grabado con láser es un proceso sin contacto entre el objeto y la herramienta. El haz de luz es generado por un diodo laser para crear un efecto de desgaste sobre la pieza o el material que se va a grabar o cortar. El nivel de desgaste (profundidad de grabado o incluso corte) puede ser desde micras hasta centímetros, dependiendo de la potencia del láser. Estos sistemas están remplazando a las antiguas máquinas-herramienta de grabado mecánico computarizadas en el sector industrial, debido a su facilidad de automatización, elevada precisión, fabricación de figuras y contornos complejos, creación de orificios pequeños y su alta velocidad de grabado y/o corte.

### 1.1 Problemática a tratar

Actualmente gran parte de las máquinas-herramientas automatizadas se controlan por Códigos G y M para programar cualquier función, lo que provoca tener una comunicación complicada entre nuevos usuarios y el sistema. Además estos mecanismos requieren herramientas de corte mecánicas, tales como punzones, cuchillas o tornos, por lo cual se les necesita invertir más dinero en repuestos, y se desperdicia tiempo en la preparación del material. Tales máquinas de grabado de gráficas convencionales que pueden ser peligrosos para el usuario, añadiendo que su velocidad de trabajo es muy pequeña en la creación de gráficos y formas muy simples y sencillas.

### 1.2 Objetivo del proyecto

Actualmente gran parte de las máquinas-herramientas automatizadas se controlan por Códigos G y M para programar cualquier función, lo que provoca tener una comunicación complicada entre nuevos



usuarios y el sistema. Además estos mecanismos requieren herramientas de corte mecánicas, tales como punzones, cuchillas o tornos, por lo cual se les necesita invertir más dinero en repuestos, y se desperdicia tiempo en la preparación del material. Tales máquinas de grabado de graficas convencionales que pueden ser peligrosos para el usuario, añadiendo que su velocidad de trabajo es muy pequeña en la creación de gráficos y formas muy simples y sencillas.

## 2. Diseño del sistema de grabado con láser

En la Figura 1 se muestra el Diagrama de Bloques en el cual hace referencia al sistema general del presente proyecto. Consta de tres secciones principales, en primer lugar se encuentra la sección del ordenador o el software, en seguida la del controlador y finalmente la de los actuadores. El ordenador se encarga del análisis de la figura y envía comandos de movimiento, el controlador emite y recibe señales de control a los drivers y la sección de actuadores realiza el movimiento mecánico.

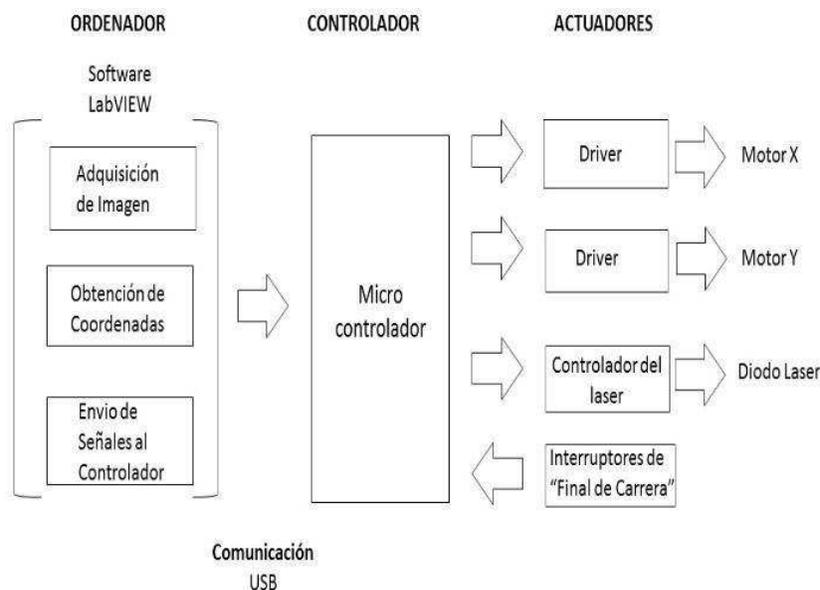


Figura 1. Diagrama de Bloques del Control.

## 3. Secciones del equipo

El proyecto a presentar consta de diferentes secciones por lo cual se presenta de forma separada y detallada cada una de ellas en los siguientes párrafos.

### 3.1 Sección Mecánica

La estructura principal de la mesa de trabajo es de aluminio, consta de dos ejes de movimiento (X,Y) y un cabezal con el diodo laser. Utiliza como mecanismo de transmisión un husillo de potencia y una corona para convertir el giro del motor en movimiento lineal, estos son los encargados del desplazamiento de cada uno de los ejes. Se utilizaron motores a pasos STP-59D3012 con una resolución de 1.8° por paso, lo cual permite el avance de los ejes en ángulos muy precisos y por pasos en las dos posibles direcciones. Se usaron sensores mecánicos como "Fin de carrera".

### 3.2 Sección de Hardware

La sección de hardware se divide en dos etapas importantes: control y potencia. La etapa de control consta del microcontrolador PIC18F4553. Esta tarjeta permite controlar 2 ejes de movimiento, para ello utiliza señales de pulso de paso y dirección para drivers de los motores a pasos. Tiene push buttons para que controlen el movimiento manual de los ejes y el reinicio del microcontrolador. Incluye un display LCD en el que se despliega la información del sistema (en activación, coordenadas, dirección) como también un buzzer que emite un sonido al finalizar el trazado de la imagen en la pieza de trabajo. Tiene cuatro entradas para interruptores limitadores de carrera. Tiene terminales para la activación y control del diodo láser por medio de un PWM generado desde el PIC. En la figura 2 se presenta el diagrama esquemático de la tarjeta de control.

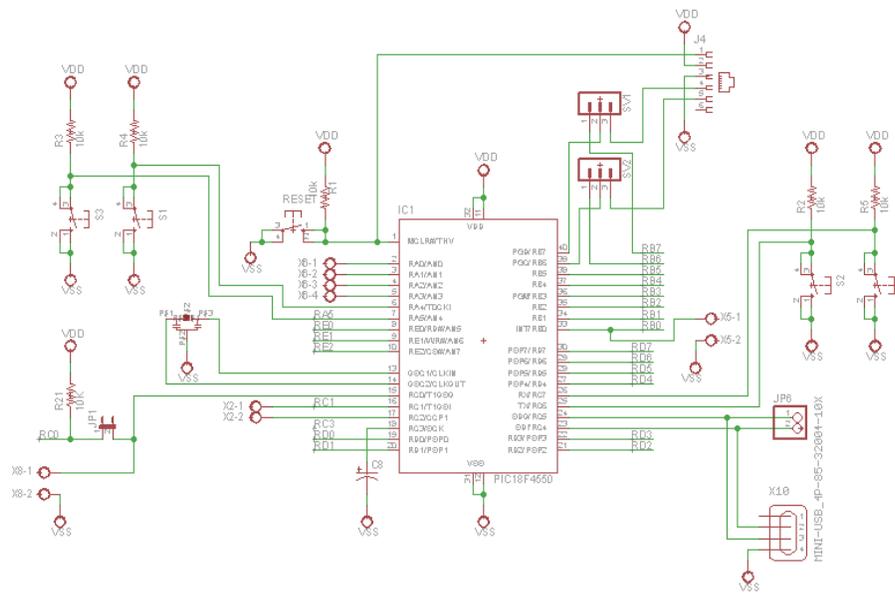


Figura 2. Diagrama esquemático de la tarjeta electrónica del sistema.

En la figura número 3 se muestra la tarjeta de control construida.

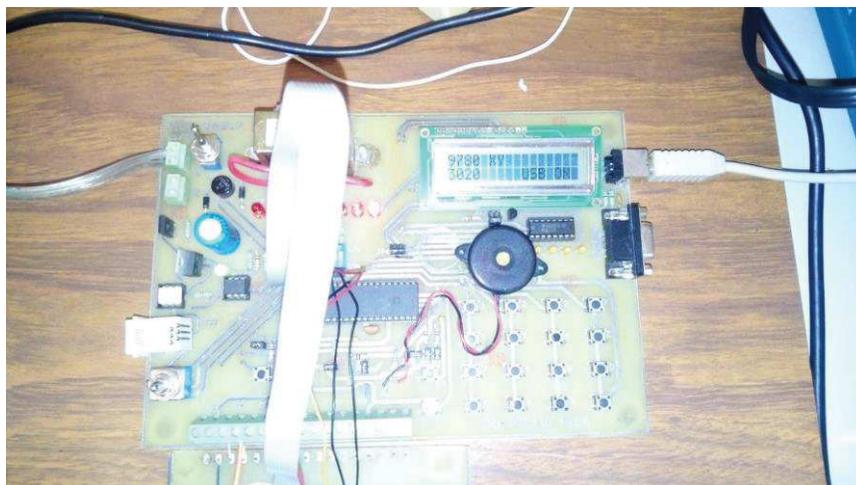


Figura 3. Tarjeta de control del sistema.



Para la etapa de potencia se desarrolló una tarjeta electrónica para la activación y control de los motores de cada eje, cuenta con opto acopladores para separar la etapa de control de potencia, los cuales conectados al L297 un circuito integrado de control de motores a pasos que genera cuatro señales de control de fase y un puente de control monolítico L298N. Ver Figura 4.

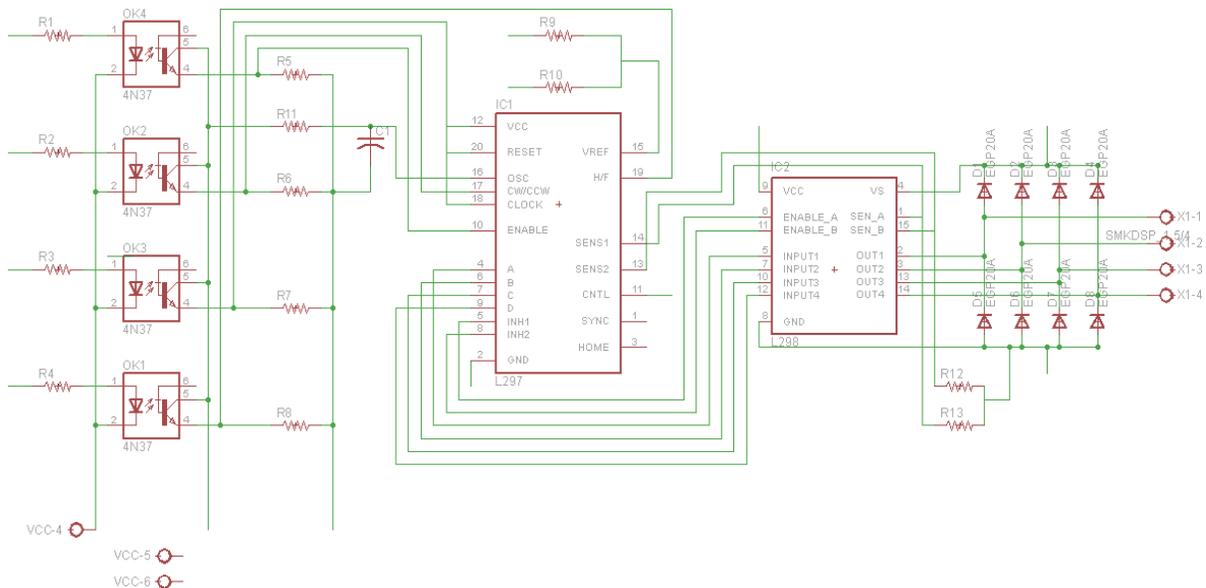


Figura 4. Diagrama esquemático de la tarjeta de control de los motores a pasos.

### 3.3 Sección de Software

El software empleado para el desarrollo del sistema de grabado láser es NI LabVIEW, debido a su facilidad de uso e incorporación al sistema.

El sistema inicia mandando a Home cada eje de manera automática antes de realizar cualquier otra función, posteriormente a través del panel de control se decide si se toma una imagen por medio de una cámara o se carga una imagen previamente adquirida. En una imagen RGB cada uno de sus tonos ocupa 2 bytes, y los valores de sus tonos van desde 0 hasta 255 y siempre se representan de manera habitual en formato Hexadecimal. El Negro es el número 0x000000 y el 0xFFFFFFFF el blanco, esto significa que entre el Negro que es el 0 y el blanco hay 16,777,215 gamas de colores diferentes. En una imagen binaria solamente se ocupan dos colores, negro y blanco, esto quiere decir que los pixeles tendrán valores de 0x000000 y 0xFFFFFFFF. A través de las funciones de Vision se puede obtener imágenes de formatos JPEG, JPEG2000, TIFF, entre otros. Por medio de ciertos filtros y módulos de programación se transforma la imagen de RGB 32 bits a una imagen binaria en blanco y negro. En la sección de LabVIEW que realiza la binarización de la imagen a trazar se realiza el siguiente proceso:

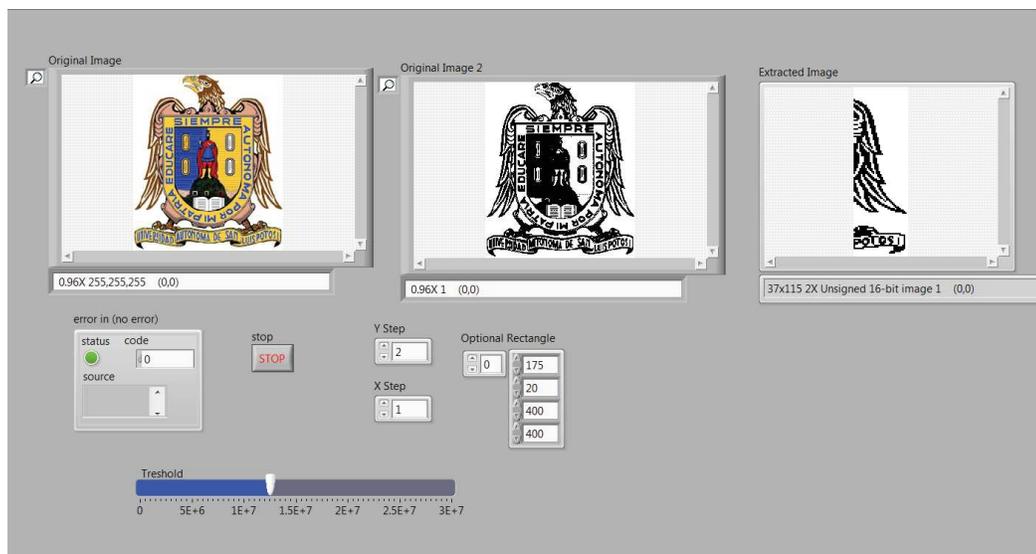
1. Carga la imagen a binarizar y la despliega de manera RGB en el Panel Frontal; dado que la información de la imagen se encuentra de manera vectorial, la transformamos a una matriz.
2. Se insertan dos ciclos "for" uno dentro del otro y los alimentamos con los datos que nos da nuestra matriz y realizamos una comparación con el valor leído del pixel y se decide si se le dará el valor correspondiente al negro o al blanco.
3. Una vez que se hizo la comparación y asignación de los valores de los pixeles se reúnen los datos en una matriz y posteriormente se hace una conversión de matriz a



4. Finalmente la imagen se guarda para posteriormente ser procesada y obtener sus coordenadas.

De igual forma cuenta con funciones de selección de región de interés (ROI, por sus siglas en inglés) permitiendo al usuario seleccionar la sección de la imagen a trazar. De esta manera, al cargar la imagen y por medio de rutinas de visión se pueden obtener las coordenadas en pixeles del contorno de una imagen. De tales coordenadas se hace la conversión a valores hexadecimales que puede interpretar el programa que controla el movimiento de cada uno de los motores. De esta forma se puede trazar con la mesa X-Y la imagen previamente adquirida.

En la figura 5 se muestra el panel frontal del programa que procesa las imágenes para su binarización y selección de la región de interés de trazado (ROI).



**Figura 5. Panel frontal del programa de binarizado de imágenes.**

En la figura 6 se muestra la fotografía tomada a un desarmador y en la figura número 7 su representación binaria necesaria para el trazado de sus contornos.



**Figura 6. Fotografía tomada a un desarmador.**



Figura 7. Imagen binarizada de la figura número 6.

### 3.3.1 Programa de control.

El programa de control en LabVIEW cuenta con opciones de movimiento manual de los ejes desde el panel frontal, funciones para escalar la imagen, velocidad de trabajo y control de la potencia del láser. En la figura 8 se muestra el diagrama a bloques del programa.

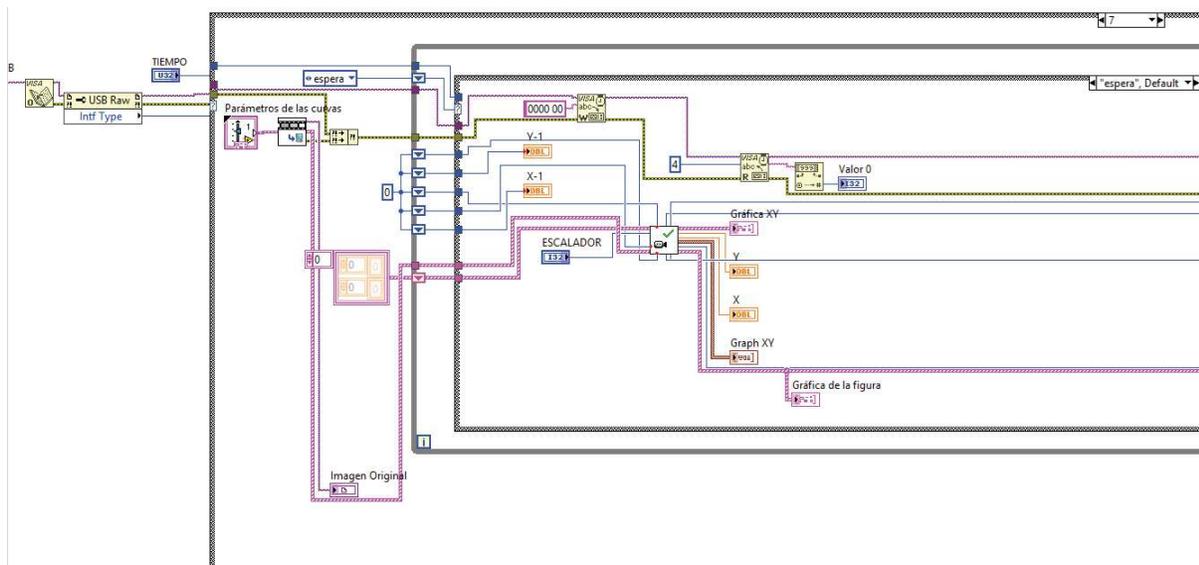


Figura 8. Diagrama a bloques del programa de control en LabVIEW.

### 3.3.2 Programa del microcontrolador

El programa en el microcontrolador primeramente inicializa los drivers de los motores y posteriormente los mueve hacia los sensores ópticos para detenerlos en cuanto estos son activados. A partir de esa posición mueve los motores un determinado número de pasos para definir la posición de referencia "Home". Posteriormente realiza la comunicación vía USB con el ordenador e indica en el LCD cuando dicha comunicación queda establecida (si hay comunicación "USB ON", si no la hay "USB OFF"). Después de ello revisa si hay comandos en el buffer de entrada USB. Los comandos que se reconocen son los siguientes: espera, dirección, número de pasos o home y cuando se reciben a la vez que son ejecutados, se muestran en el LCD. La posición se recibe acompañada de un valor numérico que determina el número de pasos que se moverá el motor.



Cuando termina el trazado de la figura activa un buzzer que indica el fin de la ejecución de la trayectoria. En la figura 9 se muestra parte del programa en C del microcontrolador.

```

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//                                     MesaIV.c                                     //
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////

#include <18F4550.h>
#define ADC = 12
#define fuses HSPLL, NOWDT, NOPROTECT, NOLVP, NODEBUG, USBDIV, PLL5, CFUDIV1, VREGEN, CCP2C1 ///////////////////////////////////////////////////CCP1B3
#define use_delay(clock=48000000)

#define USB_HID_DEVICE FALSE //No se trate de un dispositivo HID
#define USB_EP1_TX_ENABLE USB_ENABLE_BULK //Se habilite EP1(EndPoint1) for IN bulk transfers
#define USB_EP1_RX_ENABLE USB_ENABLE_BULK //Se habilite EP1(EndPoint1) for OUT bulk transfers
#define USB_EP1_TX_SIZE 64 //Memoria a reservar para el endpoint tx (Inpipe)
#define USB_EP1_RX_SIZE 3 //Memoria a reservar para el endpoint rx (Outpipe)

#include <P18F4553.INC>
#include <pic18_usb.h> //Carga de las librerias USB.
#include <usb_desc_scope_win7.h> //Carga el header con las definiciones.
#include <usb.c>
#include <lcd_cxx.inc>
#include <filex_lcd877A.c>

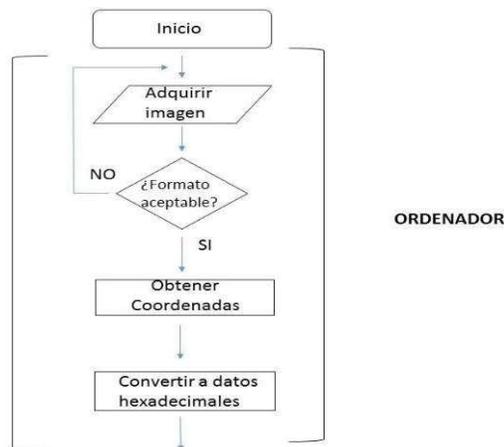
#define PORTA = 0xF80
#define PORTB = 0xF81
#define PORTC = 0xF82
#define PORTD = 0xF83
#define PORTE = 0xF84

#define LED0 = 0xF81.0
#define LED1 = 0xF81.1
#define LED2 = 0xF81.2
#define LED3 = 0xF81.3
#define LED4 = 0xF81.4
#define LED5 = 0xF81.5
#define LED6 = 0xF81.6
#define LED7 = 0xF81.7

#define LEDa0 = 0xF80.0
#define LEDa1 = 0xF80.1
#define LEDa2 = 0xF80.2
#define LEDa3 = 0xF80.3
#define LEDa4 = 0xF80.4
#define LEDa5 = 0xF80.5
    
```

Figura 9. Programa en C del microcontrolador.

En la figura 10 se muestra un diagrama de flujo que expresa toda la sección de software del sistema.



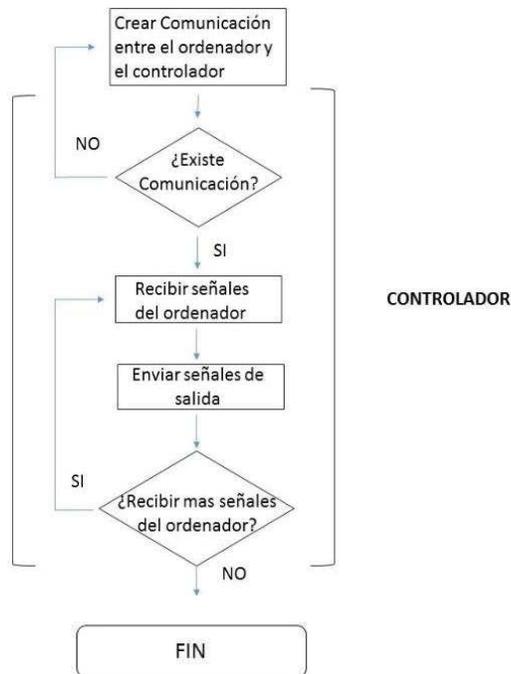


Figura 10. Diagrama de flujo del programa del sistema de grabado láser.

## 4. Resultados

Las pruebas realizadas al sistema fueron de perpendicularidad, posicionamiento y grabado, para ello se calculó el error entre los valores teóricos y los reales, como de igual forma su promedio (media) y desviación estándar.

$$\%Error = \left| \frac{Valor_{Teorico} - Valor_{Real}}{Valor_{Teorico}} \right| \times 100 \quad (1)$$

$$Media(X) = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (2)$$

$$Desviación = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (3)$$



#### 4.1 Prueba de perpendicularidad

La estructura del sistema de grabado láser es de arquitectura cartesiana, por lo tanto es muy importante comprobar la perpendicularidad entre los ejes X-Y. La prueba de perpendicularidad se realizó mediante el trazado de un triángulo rectángulo, en donde A es el cateto correspondiente al eje X, B es el cateto que corresponde al eje Y y C es la hipotenusa. Los valores de la Tabla 1 se dan en milímetros.

**Tabla 1. Prueba de perpendicularidad.**

A (medido)	B (medido)	C (medido)	c ( $c^2=a^2+b^2$ )	% Error (mm.)
49.7	99.8	111.5	111.8	0.26
19.8	30.1	36.02	36.06	0.11
69.7	99.8	121.72	122.07	0.3
99.6	150.2	180.2	180.3	0.06
179.8	279.7	332.51	332.9	0.12
<b>Media</b>				0.17
<b>Desviación</b>				0.1039

#### 4.2 Prueba de posicionamiento

Se realizó el grabado de diferentes líneas, se midió el valor de la coordenada X y Y, y finalmente se comparó con el valor establecido. Los valores de la Tabla 2 se se dan en milímetros.

**Tabla 2. Prueba de posicionamiento.**

Coordenadas enviadas		Coordenadas reales		% Error (mm.)	
X	Y	X	Y	X	Y
100	100	99.4	99.5	0.6	0.5
200	100	200.2	99.5	0.1	0.5
250	175	250.1	174.8	0.04	0.11
325	225	324.8	224.7	0.06	0.13
500	330	499.5	330.1	0.1	0.03
620	585	619.7	584.8	0.04	0.03
<b>Promedio</b>				0.1567	0.2167

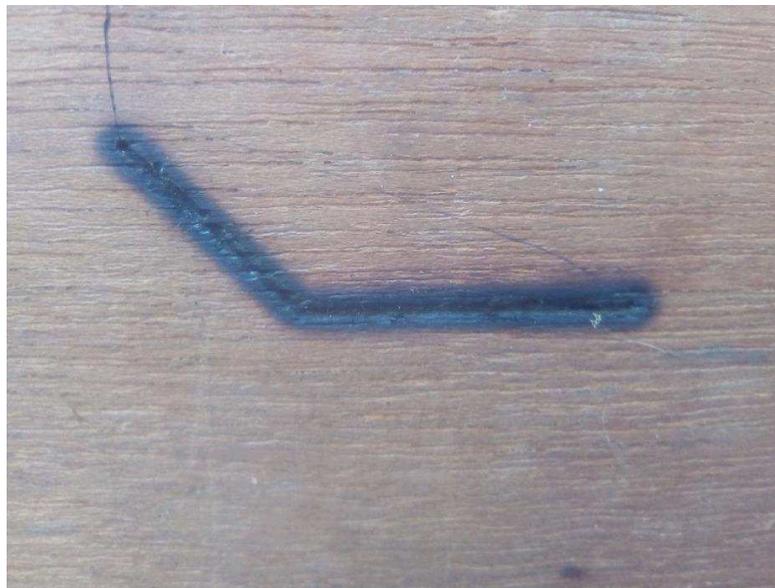
#### 4.3 Pruebas de grabado.

Para obtener una buena caracterización del sistema se realizó el grabado en un material de fácil trabajo como lo es la madera. En la figura 11 se muestra el contorno de una pieza mecánica automotriz grabada en madera.



**Figura 11. Grabado de pieza mecánica en madera.**

De igual forma se han realizado pruebas de corte en madera con la velocidad y potencia del láser más baja que permite un mayor tiempo de vida del mismo. En la figura 12 se muestra una prueba de corte en madera.



**Figura 12. Prueba de corte en madera.**

En la figura 13 se muestra el corte en madera de una imagen previamente adquirida.



Figura 13. Corte de figura en madera.

#### 4. Conclusiones

Se diseñó e implementó de manera exitosa un prototipo del sistema de grabado láser de Helio-Neón (HeN), basado en el microcontrolador PIC18F4553-I/P que se comunica a través de una interfaz USB con el programa de generación de trayectorias implementado en LabVIEW. Este prototipo se desarrolló en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO) de la Universidad autónoma de San Luis Potosí. El sistema desarrollado permite realizar cortes o grabados en materiales blandos. Las ventajas que presenta este prototipo son las de permitir realizar trabajos de una manera fácil, rápida, segura, limpia y productiva. A continuación, en la figura 14 se aprecia el ordenador del sistema durante un proceso de grabado.



Figura 14. Ejecución del programa de grabado.



El grabado por láser es un procedimiento inteligente, relativamente sencillo y rentable en trabajos grandes como las producciones en masa. Este prototipo permite dar una mayor facilidad de manejo entre el usuario y la máquina, sin la necesidad de conocimientos tan exigentes como se requiere con otras máquinas-herramienta. En la figura número 15 se muestra el sistema en el trabajo de trazado en madera.

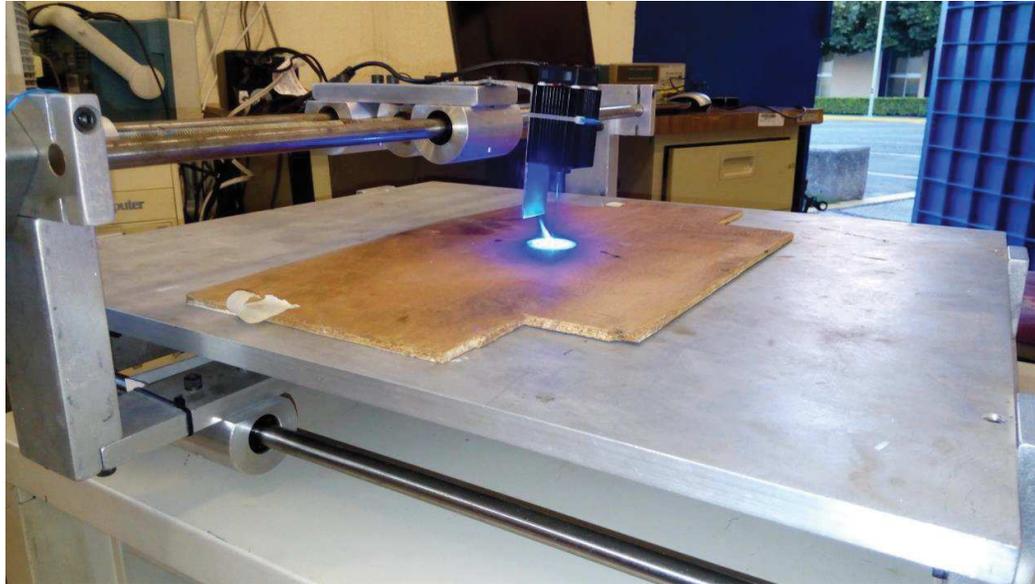


Figura 15. Sistema de grabado láser.

## Referencias

- [1] STMicroelectronics [Internet] L298. Disponible desde: < [www.st.com/resource/en/datasheet/cd00000063.pdf](http://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00000063.pdf) > [Acceso 27 de Agosto 2017].
- [2] STMicroelectronics [Internet] L297. Disponible desde: < [https://www.sparkfun.com/datasheets/.../L298\\_H\\_Bridge.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/.../L298_H_Bridge.pdf) > [Acceso 27 de Agosto 2017].
- [3] MicrochipTechnologyInc. [Internet] PIC18F4553. Disponible desde: < [ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39887b.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39887b.pdf) > [Acceso 27 de Agosto 2017].



# Sistema Anticolisión para el control de un vehículo aéreo no tripulado UAV

PINEDA, Ulises<sup>1</sup> †, SIORDIA, Xóchitl<sup>2</sup>, CAO ROMERO, Dulce<sup>2</sup>, SAN MARTIN Crescencio<sup>2</sup>, RAMIREZ Luis<sup>2</sup>.

Universidad Autónoma de San Luis Potosí (<sup>1</sup>) Universidad Veracruzana (<sup>2</sup>)

## Resumen

*Un Vehículo Aéreo no Tripulado UAV -por sus siglas en inglés relativas a “Unmanned Aerial Vehicle”- es una aeronave que vuela sin tripulación propulsada por motores eléctricos, de explosión o reacción que le ayudan a mantener un nivel de vuelo sostenido y controlado. En este artículo se presenta la metodología e implementación de un sistema anticolisión para la detección de los obstáculos que aparecen de manera repentina en el entorno de vuelo de un UAV. La metodología que aquí se expone utiliza un arreglo de sensores ultrasónicos que codifican en un patrón la ubicación del obstáculo en el ambiente del vuelo y un mecanismo anticolisión que debe ser capaz de reconocer la ubicación del obstáculo al mapear el patrón de señales que le entrega el arreglo de sensores a fin de tomar decisiones que le permitan mantener el control de vuelo del UAV y evitar la colisión, en un entorno de vuelo real. El mecanismo anticolisión se implementa en un algoritmo dinámico que es ejecutado en Python desde una tarjeta de adquisición Raspberry Pi 3 modelo B que se enlaza al UAV a través el protocolo de comunicación MAVLink. La implementación del sistema anticolisión se realiza en un UAV semiprofesional de la marca Helidroid modelo KB-1000 comprobando que la detección del obstáculo y el control del vuelo no dependen del sistema GPS o de algún otro sistema de control externo, sino únicamente del patrón de señales ultrasónicas que entrega el arreglo y del algoritmo de procesamiento.*

**Palabras clave:** UAV, sistema anticolisión, sensores ultrasónicos, control de vuelo.

## 1. Introducción

Un Vehículo Aéreo, no Tripulado denominado UAV por sus siglas en inglés relativo a Unmanned Aerial Vehicle es una aeronave que vuela sin tripulación propulsada por motores eléctricos, de explosión o reacción que le ayudan a mantener un nivel de vuelo controlado y sostenido. Recientemente, el uso de vehículos aéreos no tripulados ha tenido un crecimiento exponencial en la investigación y en el ámbito comercial con un número creciente de aplicaciones, por ejemplo: búsqueda y rescate, vigilancia, inspección áreas de estructuras, monitoreo agroindustrial y forestal, videografía, entre otras. Dichas actividades se realizan tanto en ambientes exteriores como interiores densamente poblados y con un alto dinamismo en el dominio espacio-temporal. Por lo que se requiere que un vehículo aéreo no tripulado vuele de manera eficientemente y de manera autónoma con las capacidades de detección y evasión de obstáculos [1].

Actualmente, la solución para lograr un vuelo autónomo es dotar a los UAV de sistemas GPS, sin embargo aún y cuando el vuelo autónomo se ejecutara con soporte GPS, esto no libraría al UAV del riesgo de colisionar con objetos que se atravesasen en medio de su ruta de vuelo, por ejemplo: aves, cables, antenas árboles o incluso personas que se atravesasen cuando el vehículo se acerque a tierra [2] es por ello que se requiere dotarlos de un sistema anticolisión.



En este artículo, se propone una metodología para que un UAV tenga la capacidad para la detección de obstáculos y evitar colisiones. Para esto se utiliza un arreglo de sensores ultrasónicos que codifican en un patrón la ubicación del obstáculo en el ambiente del vuelo y un mecanismo anticolidión que debe ser capaz de reconocer la ubicación del obstáculo al mapear el patrón de señales que le entrega el arreglo de sensores a fin de tomar decisiones que le permitan mantener el control de vuelo del UAV y evitar la colisión en el entorno de vuelo real. El mecanismo anticolidión se implementa en dos etapas, -la primera utiliza un arreglo de sensores ultrasónicos que codifican en un patrón de señales, la ubicación del obstáculo y la segunda consiste en un algoritmo que debe corregir la posición y controlar la velocidad del UAV durante la navegación al detectar el obstáculo. El algoritmo es ejecutado en Python desde una tarjeta de adquisición Raspberry Pi 3 modelo B que se enlaza al UAV a través del protocolo de comunicación MAVLink. Para evaluar la metodología propuesta, se realiza la implementación en un UAV semiprofesional de la marca Helidroid modelo KB-1000, ya que el arreglo de sensores codifica un patrón con la ubicación del obstáculo y el algoritmo de control debe medir la distancia a la cual el UAV debe frenar y detenerse para evitar la colisión a partir de que el obstáculo es detectado. Los resultados obtenidos, indican que la propuesta que aquí se presenta es factible y eficaz, únicamente el patrón de señales ultrasónicas y el algoritmo de control de vuelo que evita la colisión.

El presente trabajo, ha sido organizado de la siguiente forma: en la sección 1, se menciona la definición de los UAV y algunas de sus aplicaciones, en la sección 2 se proporciona una breve descripción de los sistemas anticolidión reportados en la literatura, la sección 3 se describe la metodología implementada para el diseño del sistema anticolidión, en la sección 4 se discute los experimentos y la validación de resultados y finalmente en la sección 5 se presentan las conclusiones.

## 2. Antecedentes

Un sistema anticolidión es un sistema de seguridad primaria que le ayuda al UAV a detectar obstáculos advirtiéndole de un posible impacto. Básicamente los sistemas anticolidión reportados en la literatura se desarrollan en base al uso de sensores de proximidad encontrando que las técnicas clásicas que se han empleado para su desarrollo son:

- Sistemas anticolidión basados en radiofrecuencia para el control del UAV
- Sistemas anticolidión de reconocimiento de patrones
- Sistemas anticolidión óptico-infrarrojo
- Sistema anticolidión basado en sensores ultrasónicos.

En la Figura 1 se observan los componentes básicos del sistema anticolidión basado en Radiofrecuencia, el cual está compuesto por las etiquetas RFID distribuidas en el territorio y un lector instalado en un vehículo aéreo no tripulado. El UAV recopila datos de los sensores RFID que se encuentran dispersos en el espacio que proporcionan los datos medidos, como se observa en la Figura 2.

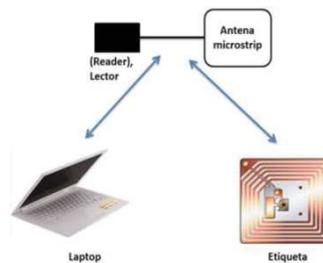


Figura 1. Componentes básicos del sistema anticolidión por RFID [3]

Las ventajas de este sistema anticolidión es que no requiere equipo auxiliar de visualización, es ligero y económico, sin embargo este sistema tiene como desventajas que si se excede el número de tarjetas por lector RFID, estas lo saturan ocasionando que no sea capaz de detectar y decodificar la solicitud enviada por el lector como se ilustra en la Figura 2.



**Figura 2. Sistema anticolidión por RFID [4]**

Estas limitaciones han sido superadas con el sistema anticolidión basado en reconocimiento de patrones de imagen. En este método de detección se utilizan dos cámaras frontales, que permiten al UAV captar imágenes de objetos. Un ejemplo de este sistema es el UAV que se muestra en la Figura 3, este método tiene la ventaja de lograr la detección de objetos de hasta una distancia 10 metros, esto hace que no dependa al 100% del GPS al efectuar el vuelo ya que los algoritmos que utiliza le permiten realizar un análisis de las imágenes que capturan las cámaras para tomar la decisión de detenerse, continuar o bordear el obstáculo sin embargo este sistema anticolidión tiene las desventajas de no detectar objetos en los laterales y de limitar al sistema anticolidión en la detección de obstáculos solo cuando el UAV va hacia adelante, además el uso de un conjunto de algoritmos complejos para el reconocimiento de patrones aumentan el tiempo de respuesta para cambiar el control del vuelo del UAV en tiempo real [5]. En la Figura 3 se muestra el modelo del UAV Phantom 4 que tiene implementado un sistema anticolidión basado en reconocimiento de patrones de imagen.



**Figura 3. Phantom 4 [6]**

Otro método para el desarrollo de sistemas anticolidión que se ha reportado en la literatura es el que emplea sensores ópticos infrarrojos implementados en una tecnología comercial llamada Teraranger. En este método, el sensor óptico infrarrojo realiza la medición de distancia utilizando un láser que tiene un alcance de 20 cm a 14 metros para detectar objetos que se encuentran en el entorno de vuelo del UAV y evitar colisiones [7]. La Figura 4 muestra un UAV con un sistema anticolidión de tecnología Teraranger. Este sistema anticolidión tiene la ventaja de que su diseño es adaptable casi a cualquier UAV semiprofesional aunado a que su tiempo de respuesta mejora al prescindir del uso algoritmos complejos como los utilizados para el reconocimiento de patrones de imagen. El diseño del arreglo de sensores de luz infrarroja que utiliza le permite obtener una velocidad de respuesta en tiempo real aun en obstáculos que se encuentran hasta 14 metros de distancia. Entre sus principales desventajas se encuentran que el uso de sensores de luz infrarroja no es óptimo en

días nublados además de que la señal puede ser absorbida por otras superficies permisibles que se encuentran en el entorno.



**Figura 4. UAV con tecnología Teraranguer [8]**

Otra técnica empleada para el diseño de sistema anticollisión hace uso de sensores ultrasónicos para detectar obstáculos que se encuentran hasta 4 metros del UAV. EL mecanismo de detección se basa en un arreglo de sensores que están distribuidos en 4 puntos alrededor del UAV como se puede apreciar en el UAV Matrice 100 mostrado en la Figura 5 [9]. Las ventajas de un sistema anticollisión de este tipo permiten prescindir del GPS para evitar obstáculos que se encuentran fuera de la línea de vista de la persona que ejecuta el control del vuelo. Su desventaja es la existencia de puntos ciegos en la parte superior y la falta de adaptabilidad a cualquier modelo de UAV.



**Figura 5. Matrice 100 [10]**

Como resultado del análisis de los sistemas anticollisión que existen en el mercado, se hallaron desventajas relativas a la complejidad de los algoritmos debido a que procesan patrones de imagen lo que retarda el tiempo de respuesta, aunado a ello tienen la desventaja de tener puntos ciegos ya que sólo logra captar obstáculos frontales debido a que no cuenta con sensores laterales. Esta limitación la solventa el sistema anticollisión Teraranguer, el cual cuenta con un arreglo de 8 sensores infrarrojos que cubren un rango 360° para lograr la detección del obstáculo, sin embargo, la principal desventaja de este sistema anticollisión es que tiene puntos ciegos en la parte superior, además de que al ser solo fabricado en Europa limita su accesibilidad por el alto costo de importación. Las limitaciones anteriormente descritas han sido solventadas en el sistema anticollisión Matrice 100 que emplea un arreglo de sensores ultrasónicos modelo HC-SR04, sin embargo presenta también el inconveniente de tener puntos ciegos en la parte superior e inferior.

En este artículo se presenta un método que mejora el arreglo de sensores ultrasónicos que se proponen en el sistema anticollisión del Matrice 100 para minimizar los puntos ciegos y además se emplea un algoritmo dinámico que hace que el sistema de control del vuelo detenga en forma automática al UAV, inclusive cuando el objeto se encuentre hasta a 80 centímetros de distancia del objeto, evitando la colisión.

### 3. Metodología

La metodología que se implementó para el diseño de este sistema anticolidión se ilustra en la Figura 6 que se detalla a continuación.



Figura 6. Metodología del sistema propuesto

En la Figura 7 se muestran los diferentes componentes utilizados en el diseño del sistema anticolidión que se propone, en la cual se observa un una tarjeta de adquisición Raspberry pi 3 modelo B y los sensores ultrasónicos HC-SR04, y el UAV semiprofesional denominado Helidroid, modelo Kb 1000, que será empleado para validar los resultados.

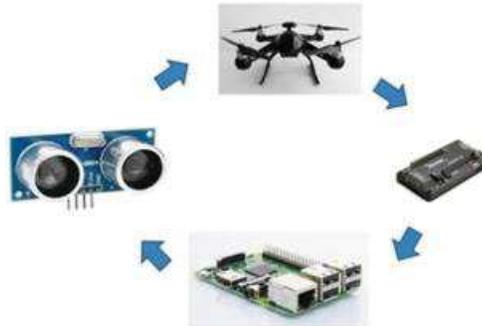


Figura 7. Elementos básicos para construir el sistema anticolidión.

Para reducir los puntos ciegos detectados en el sistema anticolidión Matrice 100 se diseñó un arreglo de 5 posiciones para colocar los sensores ultrasónicos HC-SR04 los cuales quedan distribuidos de la siguiente manera: uno al frente del UAV, otros 2 en las partes laterales -derecha e izquierda-, otro en la parte trasera, y por último uno en la parte superior del vehículo, tal como se observa en la Figura 8.

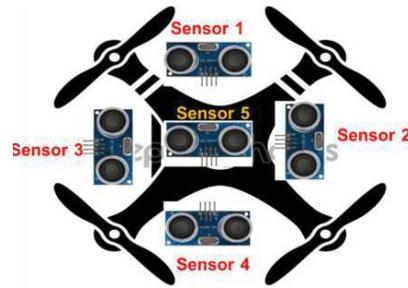


Figura 8. Distribución de los sensores

El HC-SR04 es un sensor de distancias por ultrasonido siendo capaz de detectar objetos al calcular la distancia a partir de un tren de pulsos, como se observa en la Figura 9.

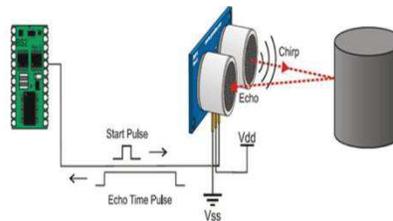


Figura 9. Esquema del sensor HC-SR04 [11]

En funcionamiento del sensor ultrasonico HC-RS04 envía un pulso de al menos 10  $\mu$ S a través del Trigger ó disparador; inmediatamente el sensor envía un tren de 8 pulsos de 40 KHz y recibe su salida en Echo. Se debe detectar este pulso e iniciar un conteo de tiempo, la salida Echo se mantiene en alto hasta recibir la señal reflejada por el obstáculo, se recomienda dar un tiempo de aproximadamente 50 ms. La distancia a la que se encuentra el obstaculo proporcional a la duración del pulso Echo y se calcula con la ecuación (1).

$$Distancia = \frac{1}{2} tiempo * 3400 \text{ cm/s} \quad (1)$$

$$Tiempo = distancia/velocidad = 80 \text{ cm} / 0.017 = 0.04705 \quad (2)$$

La distancia se obtiene en el resultado la ecuación 2 y 3:

$$Distancia = \frac{1}{2} * 0.04705 \text{ s} * 3400 \text{ cm/s} \quad (2)$$

$$Distancia = 79.98 \text{ cm} \approx 80 \text{ cm} \quad (3)$$

La Raspberry pi modelo B se utilizó como una tarjeta de adquisición por las siguientes características que presenta que lo hace factible para el sistema anticolidión.

- 1.2 GHz de 64 bits de cuatro núcleos de CPU ARMv8
- 802.11n Wireless LAN
- Bluetooth 4.1
- 4 puerto USB
- 40 pines GPIO (entrada y salida)

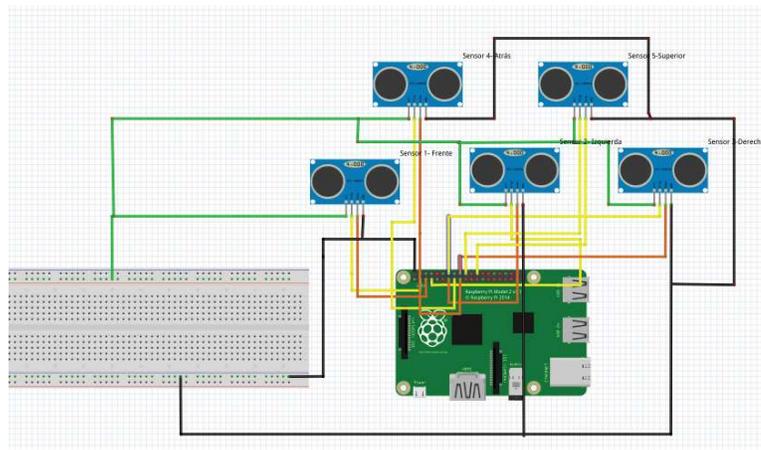
- 1 GB de RAM
- Puerto HDMI
- Puerto Ethernet
- Conector de audio de 3.5 mm
- Interfaz de cámara (CSI)
- Interfaz de pantalla (DSI)
- Ranura para tarjetas micro SD

En la Figura 10 se aprecia la tarjeta Raspberry Pi que utilizamos para la implementación de este sistema.



**Figura 10. Raspberry Pi 3 modelo B**

La implementación del arreglo de sensores en la Tarjeta Raspberry Pi 3 modelo B se muestra en la Figura 11



**Figura 11. Diagrama de conexión del arreglo de los sensores a la Raspberry Pi 3B**

La Figura 12 muestra el diagrama de flujo del algoritmo de detección de obstáculos donde se observa el comportamiento que se desea obtener al implementarlo en la tarjeta Raspberry Pi 3 B.

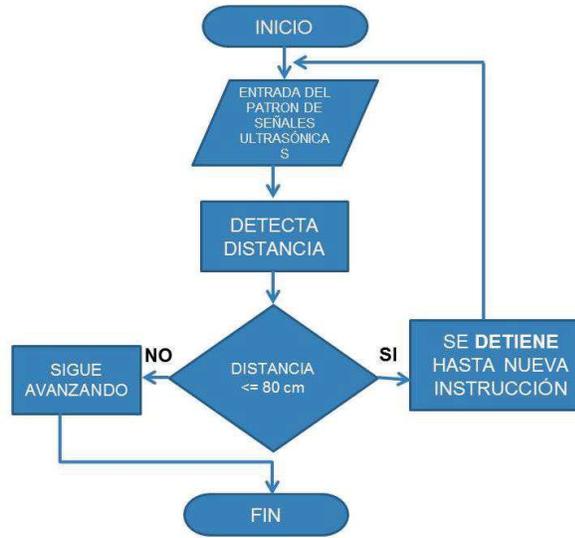


Figura 12. Diagrama de flujo del Sistema Anticolisión

El algoritmo mostrado en el diagrama de flujo de la Figura 12 se implementó en la tarjeta Raspberry Pi 3 B utilizando el Software Python versión 2.0. Los detalles del código se describen a continuación:

```

import RPi.GPIO as GPIO
from dronekit import connect,
VehicleMode, LocationGlobalRelative
from pymavlink import mavutil
import time
#Configuracion de los pines
GPIO.setmode(GPIO.BOARD)
#Sensor 1
Trigger1 = 10
Echo1 = 12
#Sensor2
Trigger2 = 7
Echo2= 11
#Sensor3
Trigger3 = 12
Echo3= 16

#Sensor4
Trigger4 = 13
Echo4 = 15
#Sensor5
Trigger5 = 18
Echo5 = 22
GPIO.setwarnings(False)
GPIO.setup(Trigger1,GPIO.OUT)#se
configura TRIGGER como salida
GPIO.setup(Trigger2,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Trigger3,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Trigger4,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Trigger5,GPIO.OUT)

GPIO.setup(Echo1,GPIO.IN)#se
configura IN como entrada
GPIO.setup(Echo2,GPIO.IN)
GPIO.setup(Echo3,GPIO.IN)
GPIO.setup(Echo4,GPIO.IN)
GPIO.setup(Echo5,GPIO.IN)
try:
    while True:
        #Establecemos trigger en bajo y lo dejamos
        medio segundo
        GPIO.output(Trigger1,False)
        GPIO.output(Trigger2, False)
        GPIO.output(Trigger3, False)
        GPIO.output(Trigger4, False)
        GPIO.output(Trigger5, False)
        time.sleep(0.5)
        #Activamos el trigger por 10
        microsegundos
        GPIO.output(Trigger1, True)
        GPIO.output(Trigger2, True)
        GPIO.output(Trigger3, True)
        GPIO.output(Trigger4, True)
        GPIO.output(Trigger5, True)
        time.sleep(0.00001)
        GPIO.output(Trigger1, False)
        GPIO.output(Trigger2, False)
        GPIO.output(Trigger3, False)
        GPIO.output(Trigger4, False)
        GPIO.output(Trigger5, False)
    
```



```

        #En la variable inicio usaremos
        la función time.time que guarda el tiempo
        inicio1=time.time()
        inicio2=time.time()
        inicio3=time.time()
        inicio4=time.time()
        inicio5=time.time()
        #Mientras no se reciba nada el
        tiempo de inicio se guarda en la variable de
        inicio
        while GPIO.input(Echo1)==0:
            inicio1=time.time()
        while GPIO.input(Echo2)==0:
            inicio2=time.time()
        while GPIO.input(Echo3)==0:
            inicio3=time.time()
        while GPIO.input(Echo4)==0:
            inicio4=time.time()
        while GPIO.input(Echo5)==0:
            inicio5=time.time
        #Cuando se reciba un uno es
        porque detecto un objeto y guarda el tiempo en
        la variable final
        while GPIO.input(Echo1)==1:
            final1=time.time()
        while GPIO.input(Echo2)==1:
            final2=time.time()
        while GPIO.input(Echo3)==1:
            final3=time.time()
        while GPIO.input(Echo4)==1:
            final4=time.time()
        while GPIO.input(Echo5)==1:
            final5=time.time()
        #Calcula el tiempo transcurrido
        t_transcurrido1 = final1-inicio1
        t_transcurrido2 = final2-inicio2
        t_transcurrido3 = final3-inicio3
        t_transcurrido4 = final4-inicio4
        t_transcurrido5 = final5-inicio5
        #La distancia actual recorrida
        se multiplica por la velocidad del sonido (cm/s)

        distancia1=t_transcurrido1*34000

        distancia2=t_transcurrido2*34000

        distancia3=t_transcurrido3*34000
    
```

```

        distancia4=t_transcurrido4*34000

        distancia5=t_transcurrido5*34000
        #La distancia resultante se
        divide entre 2 porque es la distancia de ida y
        regreso
        distancia1=distancia1/2
        distancia2=distancia2/2
        distancia3=distancia3/2
        distancia4=distancia4/2
        distancia5=distancia5/2

        if distancia1 < 80:
            #se queda en ese lugar y no
            avanza
        mavutil.mavlink.MAV_GOTO_DO_HOLD
        if distancia2 < 80:
            #se queda en ese lugar y no
            avanza
        mavutil.mavlink.MAV_GOTO_DO_HOLD
        if distancia3 < 80:
            #se queda en ese lugar y no
            avanza
        mavutil.mavlink.MAV_GOTO_DO_HOLD
        if distancia4 < 80:
            #se queda en ese lugar y no
            avanza
        mavutil.mavlink.MAV_GOTO_DO_HOLD
        if distancia5 < 80:
            #se queda en ese lugar y no
            avanza
        mavutil.mavlink.MAV_GOTO_DO_HOLD
        if distancia6 < 80:
            #se queda en ese lugar y no
            avanza
        mavutil.mavlink.MAV_GOTO_DO_HOLD
        vehicle.send_mavlink(msg)
        except KeyboardInterrupt:
            GPIO.cleanup()
    
```

Una vez que se ha implementado el algoritmo anteriormente descrito se procede a hacer la comunicación a través de mavproxy por el puerto USB con ayuda del protocolo RS232. Para realizar dicha acción se descargan los paquetes screen python-wxgtk2.8 python-matplotlib, python-opencv python-pip, python-numpy, python-dev, libxml2-dev, libxslt-dev y a través de pip se instala future, pymavlink y mavproxy, desde la terminal de la Raspberry Pi, mostrada en la Figura 13. Una vez instalados estos paquetes se procede a abrir la configuración de los puertos de entrada GPIO de la Raspberry Pi con sudo raspi-config y se seleccionan los puertos de salida, después se abre mavproxy desde la terminal de la Raspberry Pi para verificar que se ha entablado la comunicación con el control



del vuelo del dron “APM” también llamado autopiloto, el comando que ejecuta este enlace es el siguiente: `-sudo -s; mavproxy.py --master=/dev/ttyAMA0 --baudrate 57600 --aircraft MyCopter-`, indicando el puerto que se utilizará y el número de baudios. Posterior a ello se procede al armado del vehículo, al teclear en la terminal: `- param show ARMING_CHECK param set ARMING_CHECK 0 arm throttle-`. La terminal indica que la comunicación esta lista cuando muestra en la pantalla los datos del vehículo. El procedimiento completo se ilustra en la Figura 13.

```
pi@raspberrypi ~ $ sudo -s
root@raspberrypi:/home/pi# mavproxy.py --master=/dev/ttyAMA0 --baudrate 57600 --
aircraft MyCopter
MyCopter/logs/2014-02-20/flight5
Logging to MyCopter/logs/2014-02-20/flight5/flight.tlog
no script MyCopter/mavinit.scr
Loaded module log
MAV> UNKNOWN> Mode UNKNOWN
APM: ArduCopter V3.2-dev (98bdbb7f)
APM: PX4: 63bac168 NuttX: 55657316
APM: PX4v2 2E001A00 09473234 33353231
Received 346 parameters
Saved 346 parameters to MyCopter/logs/2014-02-20/flight5/mav.parm
STABILIZE> Mode STABILIZE
MAV> param show ARMING_CHECK
ARMING_CHECK 1.000000
STABILIZE> param set ARMING_CHECK 0
STABILIZE> arm throttle
STABILIZE> APM: command received:
APM: GROUND START
APM: Initialising APM...
APM: Calibrating barometer
APM: barometer calibration complete
Got MAVLink msg: COMMAND_ACK {command : 400, result : 0}
STABILIZE> mode loiter
STABILIZE> LOITER> Mode LOITER

LOITER> █
```

Figura 13. Comunicación de Mavlink con Raspberry Pi

#### 4. Validación de Resultados

Para validar los resultados el sistema anticolidión propuesto se implementó en un UAV de marca Helidroid modelo KB 1000, este vehículo es de una plataforma aérea semiprofesional, estable y económica, cuenta con modo manual, GPS, estabilización de altitud y de regreso al lugar de donde despegó de manera automática, el alcance es de 500 metros radiales, el tiempo de vuelo es de 18-20 minutos. Tiene un controlador de vuelo de ArduPilot Mega, “APM”, de modo que el sistema puede ser utilizado con las plataformas Mission Planner, ofreciendo la capacidad de control desde tierra, siendo además completamente open source o de código abierto con software libre, por lo que ofrece la posibilidad de modificar sus parámetros de vuelo.

Las Figuras 14 y 15 muestran la implementación del sistema anticolidión completo haciendo mención que para realizar el montaje del arreglo de sensores y de la Raspberry Pi -en el UAV- se hizo necesario emplear el acrílico por ser un material liviano y de bajo costo.

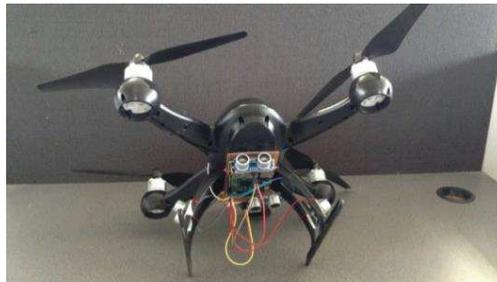


Figura 14. Implementación de los sensores en el UAV



Figura 15. Implementación de los sensores en el UAV

Finalmente se ejecutó las pruebas de vuelo del UAV para validar la respuesta del sistema anticollisión, en lo referente a la disminución de puntos ciegos y también para probar la robustez del algoritmo al detener el UAV en caso de detectar el obstáculo. En éste caso **las pruebas de vuelo fueron realizadas en un espacio al aire libre con edificios y árboles, se eligió como objeto a detectar un árbol, por tener superficies en movimiento.** La Figura 16 muestra que el sistema propuesto es robusto ya que el algoritmo logra que el sistema de control del UAV se detenga a una distancia de 80 centímetros para evitar colisionar con el obstáculo, tal acción se logra debido a que los sensores ultrasónicos envían un tren de pulsos en microsegundos por el disparador Trigger, el Echo se mantiene en alto para recibir la señal reflejada por el obstáculo.



Figura 16. Implementación del sistema anticollisión con sensores HC-SR04



En la Tabla 1 se observan los patrones que indican el comportamiento de cada uno de los sensores HC-RS04 que muestran que mientras no hay ningún obstáculo en el espacio del UAV este sigue tripulando, indicando con un 0 que no hay obstáculo; cuando el sensor ha detectado el obstáculo toma el valor de 1 haciendo que el UAV se detenga.

Tabla 1. Esquema del patrón anticolidión.

PATRÓN	Sensor 1 Frente	Sensor 2 Izquierda	Sensor 3 Derecha	Sensor 4 Atrás	Sensor 5 Arriba	Salida 1 Avanza	Salida 2 Se detiene
P1	0	0	0	0	0	0	0
P2	0	0	0	0	0	1	1
P3	0	0	0	0	1	0	1
P4	0	0	0	1	0	0	1
P5	0	0	0	1	1	0	1
P6	0	0	1	0	0	0	1
P7	0	0	1	0	1	0	1
P8	0	0	1	1	0	0	1
P9	0	0	1	1	1	0	1
P10	0	1	0	0	0	0	1
P11	0	1	0	0	1	0	1
P12	0	1	0	1	0	0	1
P13	0	1	0	1	1	0	1
P14	0	1	1	0	0	0	1
P15	0	1	1	0	1	0	1
P16	0	1	1	1	0	0	1
P17	0	1	1	1	1	0	1
P18	1	0	0	0	0	0	1
P19	1	0	0	0	1	0	1
P20	1	0	0	1	0	0	1
P21	1	0	0	1	1	0	1
P22	1	0	1	0	0	0	1
P23	1	0	1	0	1	0	1
P24	1	0	1	1	0	0	1
P25	1	0	1	1	1	0	1
P26	1	1	0	0	0	0	1
P27	1	1	0	0	1	0	1
P28	1	1	0	1	0	0	1
P29	1	1	0	1	1	0	1
P30	1	1	1	0	0	0	1
P31	1	1	1	0	1	0	1
P32	1	1	1	1	0	0	1
P33	1	1	1	1	1	0	1



## 5. Conclusiones

La Tabla 2, muestra una comparación entre el sistema anticolidión Matrice 100 contra el sistema anticolidión que se propone en este artículo, ya que ambos sistemas emplean un arreglo de sensores basados en el sensor ultrasónico modelo HC-SR04. El análisis comparativo pone en evidencia que al mejorar el arreglo de sensores se logra disminuir los puntos ciegos que existen en el Matrice 100, y asimismo se comprueba que el algoritmo empleado logra detectar obstáculos a una distancia de 80 cm haciendo que el control de vuelo detenga al UAV evitando la colisión.

**Tabla 2. Análisis comparativo de los sistemas anticolidión con sensores ultrasónicos**

Características	Matrice 100	Sistema propuesto
Modelo	M100	Helidroid
Numero de sensores	4	5
Tiempo de vuelo	20 minutos	15 minutos
Costo	\$ 72.600.00	\$ 7500.00
Distancia de detección	4 metros	Menor o igual a 80 centímetros
Modelo de sensores	HC-SR04	HC-SR04
Tarjeta de adquisición de datos	Guidance	Raspberry pi modelo B
Para que tipos de UAV se puede implementar (profesionales o semiprofesionales)	Profesionales	Semiprofesionales y profesionales

Otra de las ventajas del sistema anticolidión -que en este artículo se expone - es la flexibilidad para adaptarse casi cualquier tipo de UAV comercial, semiprofesionanal o profesional lo cual le proporciona una versatilidad de uso. El empleo de algoritmos simples reduce el tiempo de respuesta del control del vuelo logrando con ello un sistema anticolidión robusto y eficaz.

La Tabla 3 muestra que el sistema anticolidión que aquí se expone también ofrece la factibilidad para construir un sistema anticolidión de bajo costo si se compara su precio con los costos de los sistemas anticolidión detallados en los antecedentes.

**Tabla 3.Comparativa de costos de los diferentes sistemas anticolidión.**

Tipo de sistema	Costo	Costo del sistema anticolidión propuesto
Sistema anticolidión por radiofrecuencia	\$10,000.00	\$7,500.00
Sistema anticolidión con sensores infrarrojos	\$25,000.00	\$7,500.00
Sistema anticolidión con reconocimiento de patrones de imagen.	\$40,000.00	\$7,500.00
Sistema anticolidión basados en sensores ultrasónicos.	\$72,600.00	\$7,500.00

En la Tabla 3, se observa que el sistema anticolidión que aquí se propone además de cubrir los requerimientos para la detección de obstáculos y minimizar las desventajas del Matrice 100 ofrece un menor costo si se le compara con ellos.



Como trabajo futuro se pretende mejorar el algoritmo a fin de incluir un módulo que logre esquivar el obstáculo a partir del tipo de patrón que se presente en el arreglo de sensores y otorgarle la autonomía al UAV al lograr que tome decisiones y también se desea mejorar el arreglo de sensores al combinar el arreglo de sensores ultrasónicos con un arreglo de sensores ópticos infrarrojos, para lograr una detección más eficiente de los obstáculos o inclusive se ha planteado la posibilidad de utilizar una cámara combinada con sensores de Kinect para realizar la detección de los obstáculos por técnicas de procesamiento de imágenes .

## Referencias

- [1] Napolitano, M. Chao, H. y Gu Y. «*A survey of optical flow techniques for uav navigations applications.*», de International Conference In Unmanned Aircraft Systems "ICUAS", 2013.
- [2] Martinez, J. Loewen, N. Marquez, F. García E y Mayos, W. «*Toeards autonomous flight of micro aerial vehicles using orb-slam.*», de 3rd. Workshop on Researchs, Education and Development of Unmanned Aerial Systems, RED\_UAS, 2015.
- [3] García, J.Escamilla, L y Álvarez, O. «*Protocolos Anticolision en RFID.*», Revista digital de las tecnologías de la información y las comunicaciones, TELEMATICA., vol. nº 12, pp. 1-9, 2013.
- [4] Greco, G. Lucianaz, C. Bertoldo, S y Allegretti, M. «*A solution for monitoring operations in harsh environment: A RFID reader for small UAV.*», Turin, Italia, 2015.
- [5] Trew, J. «*DJI Phantom 4, con evitacion de obstaculos y modo de velocidad.*», engadged, pp. 1-5, 3 de enero 2016.
- [6] Javier, J. «*caracteristicas tecnicas DJI Phantom.*», DJI, pp. 1-3, Marzo 1 de Marzo 2016.
- [7] Caceres, J. «*Torre TeraRanguer para drone Anticolision.*», Dronografia, pp. 1-6, Febrero 28 de 2017.
- [8] Ruffo, M. «*TeraRanguer by Terabee.*», Teraranguer, pp. 1-5, 2016.
- [9] Palazuelos, F.«*DJI un sistema que evita que los drones colisionen con objetos.*», Hipertextual, pp. 1-4, 08 Junio 2015.
- [10] On, N. «*DJI's Matrice 100 Quadcopter con evitación de colisiones.*», Adam Savage's Tested, pp. 1-4, 18 Junio 2015.
- [11] Sebastian, L. «*Medir distancia con sensor ultrasonico HC-RS04.*», Arduino, Seba Electronic LABs, pp. 1-6, 2015.



# Prototipo de un Sistema de Navegación por Locomoción para Ambientes Virtuales

Hernández Mateo Edrein, Sepúlveda Cervantes Gabriel

Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Computo  
I.P.N. México Ciudad de México.  
edreinhernandez@gmail.com, boygag@gmail.com

## Resumen

*En este artículo se presenta un prototipo de caminadora omnidireccional que será empleado como plataforma de navegación para el desarrollo de ambientes virtuales. La fabricación del prototipo es de miembro estructural. Adicionalmente se hicieron adaptaciones de otros materiales para la base de la caminadora y soporte del cuerpo. La caminadora omnidireccional permite al usuario desplazarse en diferentes direcciones de manera natural con la ayuda de unas sandalias de plástico que van en la parte baja del calzado, fue realizada con materiales de bajo costo, de manera que resulta más económica que las caminadoras omnidireccionales comerciales, aunado a esto se realizó un ambiente virtual de prueba.*

**Palabras clave:** Locomoción, Ambientes Virtuales, Omnidireccional.

## 1. Introducción

Para interactuar con sistemas de realidad virtual se han desarrollado distintos dispositivos dependiendo de la necesidad a cubrir (controles de helicóptero, volantes de carros, joysticks, por mencionar algunos), los cuales le permiten al usuario interactuar con el ambiente virtual, sin embargo, a pesar de que se cuenten con dispositivos de este tipo no recrean la sensación de navegación (desplazamiento físico del usuario), ya que comúnmente se utilizan joysticks o en su defecto teclado y mouse para la navegación. El objetivo de este tipo de dispositivos consiste en brindar una herramienta que le permita al usuario desplazarse físicamente con la finalidad de que se logre una navegación más realista y natural en ambientes virtuales, siempre y cuando requieran dicha acción. uno de los aspectos más importantes al momento de desarrollar esta clase de dispositivos es la base de la caminadora para lo cual.

Existen dos métodos para su desarrollo:

- Método Pasivo:

El usuario se desplaza a través de la superficie de la caminadora siendo la base fija. Ejemplo Cyberith Virtualizer, Virtuix Omni, Wizrish ROVR.

- Método Activo

Es más complejo que el método pasivo ya que cuenta con una banda o rodamientos mecánicos que desplazan al usuario cuando este ejecuta un desplazamiento en una determinada dirección manteniéndolo la mayor parte del tiempo en el centro. Ejemplo: Infinadeck.

## 2. Caminadoras Omnidireccionales

Existen diversas plataformas omnidireccionales comerciales entre las cuales se puede mencionar: La caminadora omnidireccional Cyberith Virtualizer [1][2]. La cual es una caminadora omnidireccional que cuenta con tres pilares que soportan un anillo exterior e interior. Donde el anillo interior cuenta con un arnés de cintura que carga el peso de la persona tal anillo interior es rotable a 360°, cuenta además con un calzado especial que al hacer contacto con la superficie de la caminadora genera una fricción baja permitiendo el desplazamiento en diferentes direcciones [3][4].



Figura 1. Cyberith Virtualizer.

De igual forma. La caminadora omnidireccional Infinadeck [5]. Cuenta con una base de dimensiones 1.7 m. de largo y 1.6 m. de ancho por 0.4 m. de alto en la superficie se encuentra una banda que permite el desplazamiento en diferentes direcciones en cada esquina se encuentran cuatro pilares encontrados en el centro se encuentra un soporte exterior axial, rotable a 360°. El peso de la persona es cargado por el soporte exterior que va fijado con una faja que va a la cintura.



Figura 2. Infinadeck

### 3. Diseño Asistido por Computadora, Motores de Videojuego y API

Día a día el desarrollo de proyectos científicos y tecnológicos en las diferentes áreas del conocimiento como son medicina, ciencias de la computación, robótica, entre otras, demandan el conocimiento de herramientas que faciliten el desarrollo de prototipos o productos comerciales.

El diseño asistido por computadora (CAD) [6] ha sido una de las herramientas primordiales a la hora de diseñar y fabricar productos. En la actualidad este tipo de herramientas no solo facilitan el diseño, sino que integran una gama basta de herramientas que nos ahorran tiempo y costos de fabricación y producción. Dada la necesidad de modelar, diseñar y ver costes de fabricación para el prototipo de la caminadora omnidireccional se buscó una herramienta que contara con un entorno intuitivo y herramientas de diseño fáciles de utilizar en este caso fue SolidWorks® en su versión 2014.



Figura 3. Pieza 3D en SolidWorks.

Durante los últimos años la realidad virtual [7] se ha convertido en una de las áreas de más estudio e innovación, la generación de ambientes virtuales [8] ha involucrado la utilización de herramientas que ofrezcan la integración fácil de hardware y software. Con base a esto se buscó un motor de videojuegos que nos ofreciera la capacidad de desarrollar e instrumentar el ambiente virtual con el prototipo, aunado a ello se escogió Unity ya que no solo nos permite el desarrollo de ambientes virtuales sino también la reutilización de código para futuras actualizaciones del proyecto.



Figura 4. Motores de Videojuego

En la actualidad existen distintos dispositivos que mejoran la experiencia de interacción en los videojuegos, muchos de estos dispositivos hoy en día cuentan con un kit de desarrollo de software (SDK) oficiales por la empresa que los desarrollo, pero otros tantos no y son desarrollados por terceros. Para instrumentar el ambiente virtual con la caminadora omnidireccional se optó por utilizar dos dispositivos el primero de ellos es el Wiimote [9] mando de la consola de videojuegos Wii de Nintendo. Y el otro dispositivo fue el Oculus Rift como visor de realidad virtual.

#### 4. Desarrollo de la Caminadora Omnidireccional

Para el diseño y modelado, se realizaron cinco modelos, el primero consistió en diseñar una base cóncava, segundo una estructura para la base cóncava y soporte de carga para el peso de la persona, tercero se diseñó un resorte estructural con la finalidad que el desplazamiento hacia abajo (Hincado o Sentado) sea suave, cuarto un destorcedor de cuerda que ira entrelazado con el arnés que se utilizara y por ultimo sandalias de plástico que se colocaran en el calzado.

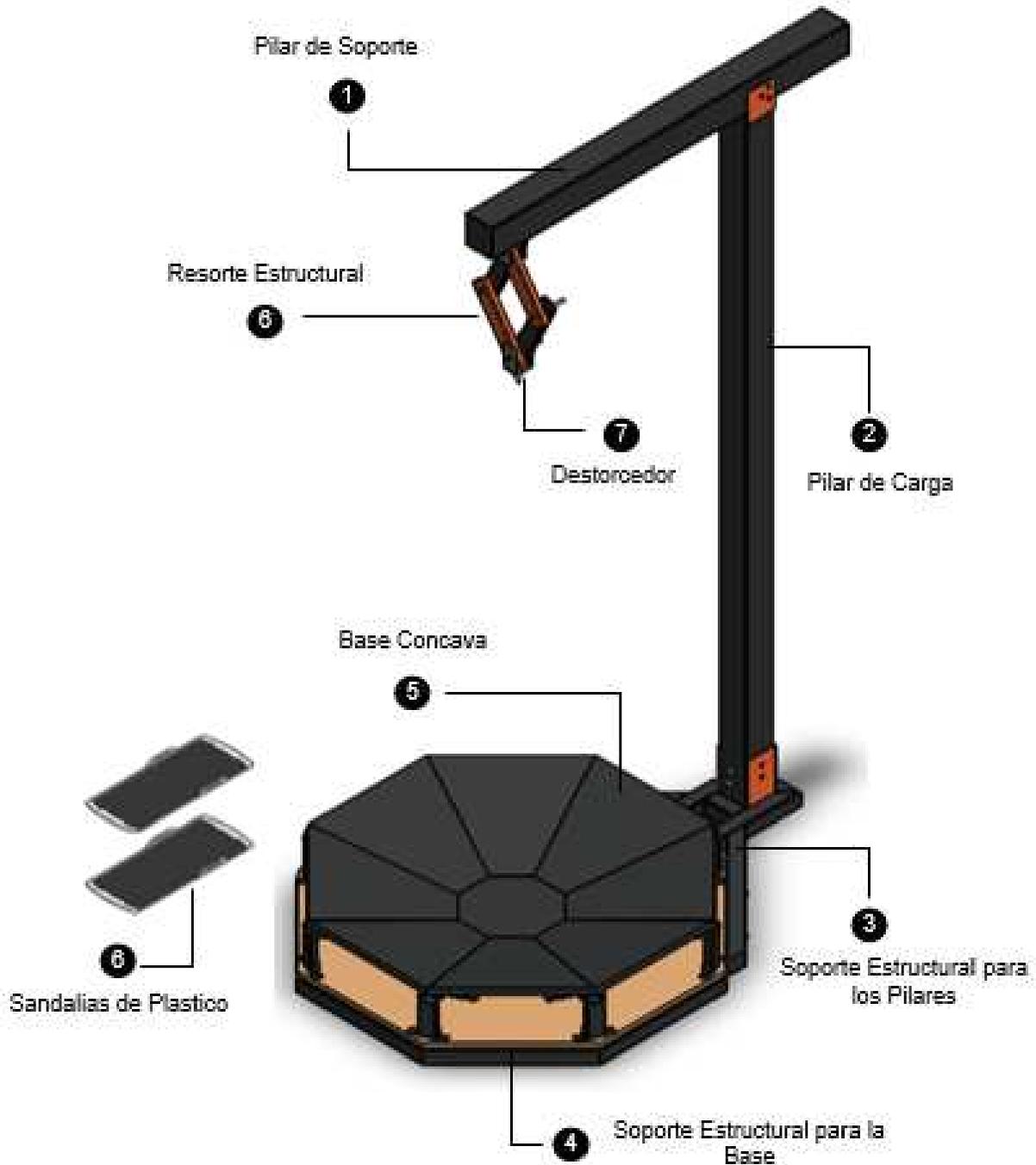
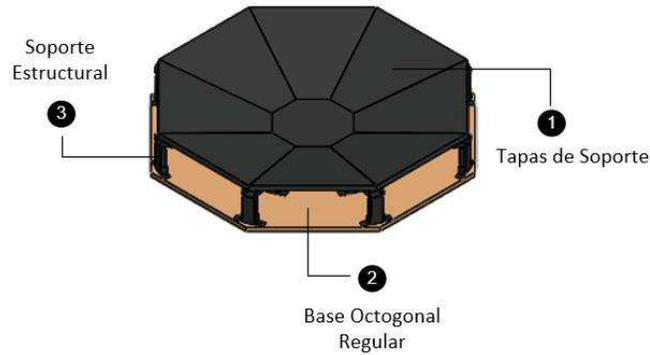


Figura 5. Modelo del Prototipo

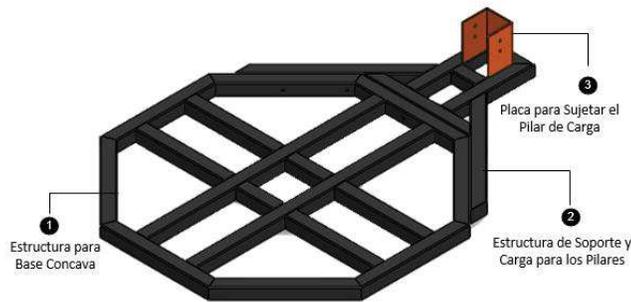


La base cóncava mide 1.20 m de ancho, la altura es de 20 cm, cuenta con soportes de miembro estructural (Tubular) que se fijan a la base octagonal y dan soporte al peso de la persona.



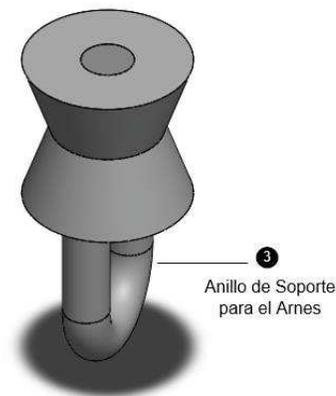
**Figura 6. Base Cóncava**

Tanto la base cóncava y los pilares son piezas separadas fijadas por tornillos con barrenos pasados permitiendo un fácil traslado a la hora de realizar pruebas.



**Figura 7. Soporte Estructural para la Base Cóncava y Pilar de Carga**

El destorcedor de cuerda tiene una resistencia de peso muerto de 560 kg.



**Figura 8. Destorcedor de Cuerda**

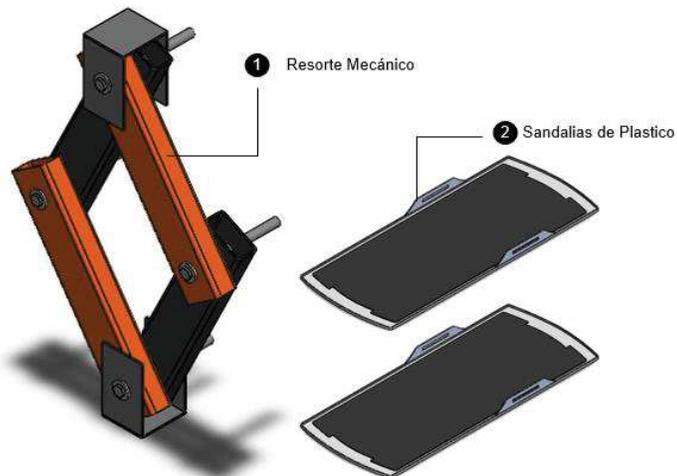


Para asegurar el soporte de la persona se utilizaron dos pilares el de soporte y el de carga, el pilar de carga mide 2.25 m. de alto mientras que el de soporte 1.30 m.



**Figura 9. Pilar de Carga y de Soporte**

SolidWorks® nos brindó las herramientas necesarias para modelar y realizar análisis de esfuerzos de las piezas que se realizaron.



**Figura 10. Resorte Mecánico y Sandalias de Plástico**

## 5. Armado y Construcción

Para la primera versión se partió de un boceto a mano alzada, una vez que se definieron las medidas y posibles materiales para su desarrollo, se optó por reutilizar madera de pino lo cual permitió reducir costos para después replantear el diseño realizado para desarrollar una segunda versión.

### 5.1 Primera Versión de la Base Cóncava

Para la primera versión se partió de un boceto a mano alzada, una vez que se definieron las medidas y posibles materiales para su desarrollo, se optó por reutilizar madera de pino lo cual permitió reducir costos para después replantear el diseño realizado para desarrollar una segunda versión.



Figura 11. Desensamble y Ensamble de la Base Cóncava

### 5.2 Segunda Versión de la Base Cóncava.

Para su desarrollo se ocupó madera tipo MDF, miembro estructural (Tubular) y alfombra para tapizar carros, Para lograr una superficie de baja fricción se forro la base cóncava con tapiz de carro ya que al momento de entrar en contacto con las sandalias de plástico que portara la persona en su calzado permitiría el desplazamiento sin dificultad.



Figura 12. Montado y Terminado de la Base Cóncava.

### 5.3 Estructura y Pilar de Carga.

En este punto se necesitó contar con un soporte que realizaría dos funciones, la primera cargar el peso de la base cóncava y el peso de la persona, para ello se utilizó miembro estructural cuadrado formando un octágono externo el cual va en la parte baja de la base cóncava.



Figura 13. Estructura para Soporte de la Base Cóncava.



Figura 14. Pilar de Carga y Estructura para Soporte de la Base Cóncava

## 6. Metodología para la Integración del Ambiente Virtual con el Prototipo de la Caminadora Omnidireccional

Para la integración de prototipo con el ambiente virtual fue necesario determinar los siguientes pasos.

### 6.1 Descripción del Sistema

El proyecto de investigación “Prototipo de un Sistema de Navegación por Locomoción para Ambientes Virtuales” se encuentra formado por los siguientes elementos (ver figura 15).



Figura 15. Descripción del Sistema

- El dispositivo Wiimote, que nos permite tomar las velocidades del acelerómetro cuando el usuario se desplaza en la caminadora omnidireccional.
- PC, donde se lleva a cabo el procesamiento de cada una de las señales que son recibidas desde el dispositivo Wiimote, para poder reconocer cual es la acción que se debe de llevar a cabo dentro del ambiente virtual.
- Ambiente Virtual, donde se lleva a cabo el desplazamiento de la persona. Y el cual se representa del siguiente modo una vista frontal, tomada desde el plano  $x - y$ , para tener una perspectiva de los desplazamientos en dichos ejes.

En el siguiente apartado se describen los pasos que se llevaron a cabo para la interacción del ambiente virtual con el prototipo.

### 6.2 Bloque de Medición.

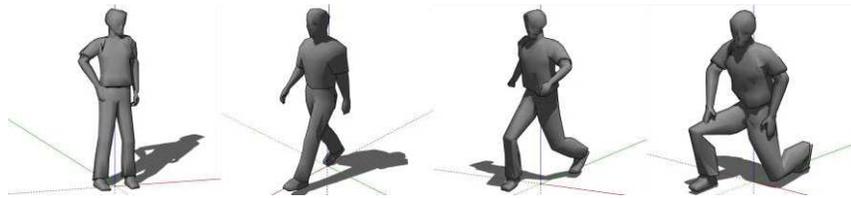
En esta etapa se buscó obtener los datos del acelerómetro que posee el Wiimote de Nintendo, para esto se ocupó el software GlovePie el cual permite programar dispositivos de entrada como son Microsoft Kinect, Falcon Novint y Wiimote entre otros. Donde GlovePie nos proporcionó una API para programar e interactuar con el Wiimote a través de Unity 3D bajo Windows 10 facilitando la obtención de sus datos, Así mismo una vez que se obtuvieron los datos, lo siguiente fue interpretar la información obtenida y ver el comportamiento de las velocidades con respecto a un espacio 3D.

### 6.3 *Bloque de Calibración.*

Para la calibración se normalizaron los valores del acelerómetro del Wiimote a 0 en sus ejes  $x, y, z$ , con la finalidad de obtener los valores de las velocidades correctamente, otro paso importante fue establecer la comunicación con el administrador de dispositivos de Windows para lo cual utilizaríamos el bluetooth del Wiimote y el de la Computadora para la recepción de datos, los cuales pasarían posteriormente al bloque de interpretación.

### 6.4 *Bloque de Interpretación y Ejecución*

En este paso se buscó que los dos pasos anteriores funcionaran bien para dar paso a la ejecución y prueba del prototipo en el ambiente virtual donde el usuario es capaz de estar parado, caminar, correr e hincarse, tales movimientos se describen de forma gráfica (ver figura 16).



**Figura 16. Representación Visual de los Movimientos del Usuario**

## 7. Pruebas

En esta sección se describirá las pruebas que se realizaron al prototipo. Una vez que se terminó de fabricar la base cóncava fue necesario elegir un material que nos ofreciera una superficie de baja fricción en este caso se optó por un material resistente y fibroso (suave) para que al momento de hacer contacto con las sandalias de plástico que el usuario porta en su calzado le permitiera desplazarse sin ningún inconveniente.



**Figura 17. Tapiz de Carro sobre la Base Cóncava**

Otra de las pruebas fue elegir el soporte que se utilizaría para sujetar al usuario, una de las principales características que se buscó es que fuese resistente, cómodo y seguro, en este caso se optó por un arnés de seguridad bajo la premisa de ofrecerle seguridad al usuario en la parte media de su cuerpo al momento de que se desplazará en la base cóncava, Para esta prueba se fijó un seguro en una placa de metal fijada en el techo en esta placa se colocó un seguro donde se sujetó una



cuerda que va fijada en el arnés, aunado a esto se probó con un ambiente virtual de prueba desarrollado en Unity 3D.

Al haber desarrollado el ambiente virtual de prueba en Unity 3D facilito la integración con el Wiimote donde por un lado se tenía ejecutado en segundo plano GlovePie con el script que se programó para la lectura de velocidades del Wiimote dicho script se ejecutó en segundo plano y por el otro lado el ambiente virtual, en el ambiente virtual se utilizó un prefab [10] (FPS) por sus siglas en inglés (First Person Controller) en español primera persona este prefab facilito la navegación en el ambiente virtual [11], una de las cualidades del prefab FPS es que se puede manipular a través del teclado generando un desplazamiento en diferentes direcciones solamente utilizando el teclado (desplazamiento) y el movimiento del mouse (sirve para darle dirección).

Pero esto no permitía el desplazamiento del usuario (parte física) se viese reflejado en el ambiente virtual por lo cual se mapearon las teclas con las que el usuario comúnmente mueve al prefab (FPS) por el Wiimote y como dirección se utilizó el Oculus Rift como casco de realidad virtual.



**Figura 18. Prueba del Ambiente Virtual con la Caminadora Omnidireccional**

Como se ve en la (figura.18) la base cóncava está en el suelo y el usuario esta sobre la base, el usuario porta dos sandalias de plástico una que es para su pie derecho y el otro para su pie izquierdo, en los bolsillos del pantalón del usuario lleva el Wiimote en cual se conecta a través de bluetooth con la PC, en la parte derecha inferior de la figura se puede observar el ambiente virtual de prueba desarrollado en Unity, donde al momento de desplazarse en la parte física recibe retroalimentación visual del avance o desplazamiento que realizo por medio del casco de realidad virtual.

Se realizaron pruebas con diversos usuarios de distintas alturas y peso. Estas pruebas resultaron de gran utilidad para analizar la resistencia de la base al momento de aplicarle peso en diferentes direcciones los pesos de los usuarios se encuentran en un rango de 60 kg a 140 kg.

## **8. Conclusiones**

En este artículo se presentó el desarrollo de una caminadora omnidireccional para la navegación (desplazamiento) en aplicaciones de realidad virtual, desde los conceptos previos hasta su implementación; la forma en la que se obtuvieron los datos del acelerómetro, como fueron interpretadas y como se interactuó con el ambiente virtual. Durante el desarrollo de esta caminadora omnidireccional, se realizaron diversas pruebas con materiales de bajo costo para la estructura de la



base cóncava con el objetivo de tener una base resistente al peso de la persona, hubo dos versiones la de prueba y la de prototipo para la primera versión se eligió madera de pino y para la otra versión se eligió madera tipo MDF por su resistencia y acabado liso.

Otro aspecto importante a mencionar es que a pesar de que la aplicación de prueba para navegar en el ambiente virtual se realizó con un equipo de cómputo de bajos requerimientos si fue necesario para su integración ocupar una computadora con más requerimientos dado que el visor de realidad virtual que se utilizó demanda más recursos computacionales.

## Referencias

- [1] Nawratil G., Rasoulzadeh A., “*Kinematically Redundant Octahedral Motion Platform for Virtual Reality Simulations*”, Institute of Discrete Mathematics and Geometry, Vienna University of Technology, 2017.
- [2] Sitio oficial Cyberith Virtualizer. <http://cyberith.com/>.
- [3] Cakmak T., Hager H., “*Cyberith Virtualizer – A locomotion device for Virtual Reality*”, Vienna University of Technology.
- [4] Muscio M., “*Hardware and software description of the Cyberith Virtualizer and its posible applications*”, STVDIVM VRBIS.
- [5] Sitio oficial Infinadeck. <http://www.infinadeck.com/>.
- [6] Gómez S. “*SolidWorks Práctico I – Pieza, Ensamblaje y Dibujo*”, Alfaomega, México, Primera Edición, 2013.
- [7] Jerald J. “*The VR Book, Human – Centered Design for Virtual Reality*”, ACM Books, U.S., Primera Edición, 2015.
- [8] Parisi T. “*Learning Virtual Reality: Developing Immersive Experiences and Applications for Desktop, Web, and Mobile*”, O’Reilly, U.S., Primera Edición, 2015.
- [9] Zulkarnain D., Stomp S., “*Studying The Wiimote – Exploration To Enhance The Feeling Of Interactivity In Applications*”, Vrije Universiteit, Amsterdam, 2007.
- [10] Okita Alex. “*Learning C# Programming with Unity 3D*”, U.S. CRC Press, México, Primera Edición, 2014.
- [11] William R., Alan B., “*Understanding Virtual Reality. Interface, Application, and Desing*”, Morgan Kaufmann, EEUU, 2003.



# Diseño y construcción de un Robot Gallito

Duran-Plaza, Mario, Gudiño-Lau, Jorge, Gómez-Estrada, Pedro,  
Alcalá-Rodríguez, Janeth, Charre-Ibarra, Saida, Chávez-Ibarra, Adrián.

Facultad de Ingeniería Electromecánica.  
Universidad de Colima  
Km. 20 carretera Manzanillo-Barra de Navidad  
Manzanillo, Colima  
E-mail: lduran0@uocol.mx, jglau@uocol.mx, pgomez1@uocol.mx,  
janethalcala@uocol.mx, scharre@uocol.mx, achavez5@uocol.mx

## Resumen

*Este trabajo muestra el diseño y construcción de un robot gallito, con la finalidad de motivar a estudiantes de Licenciatura a estudiar el área de mecatrónica, este robot móvil es diseñado para la competencia de robots gallitos. El robot es construido para sujetar dos globos y además tiene la habilidad de atacar a otro robot móvil con el objetivo de destruir los globos de sus oponentes. El robot tiene un arma que se encarga de reventar los globos de sus oponentes. El robot gallito está compuesto por sensores como ultrasónicos, infrarrojos y encoders; y por actuadores como motores de corriente directa. Además, en este trabajo se describe de forma detallada el diseño mecánico, el diagrama electrónico y el programa; para que el lector pueda construir su propio robot gallito. El robot es autónomo programado para defender y después atacar.*

**Palabras clave:** Robots móviles, arduino, competencias de robots, sensores y actuadores.

## 1. Introducción

Los robots móviles surgen de la necesidad de extender el campo de aplicación del área de la robótica. La mayoría de los robots móviles son autónomos es decir la intervención del ser humano es nula. Los robots móviles tienen como precedentes los dispositivos electromecánicos desde el punto de vista de la autonomía, tales como los denominados "micro-mouse" creados desde los años treinta para desarrollar funciones inteligentes tales como descubrir laberintos. Cabe destacar la tortuga de Walter, presentada en 1948, que podía reaccionar ante la presencia de obstáculos, subir pendientes y, cuando la alimentación comenzaba a ser insuficiente, dirigirse hacia una posición de recarga.

Estos trabajos de investigación no guardan una relación directa de los vehículos autónomos que comenzaron a usarse desde los años sesenta en la industria, siendo guiados por cables bajo el suelo o sensores ópticos para seguir líneas trazadas en la planta. Estas aplicaciones, hoy en día comunes en muchos procesos de fabricación, se caracterizan por un entorno fuertemente estructurado para facilitar la automatización.

En los años setenta se vuelve a trabajar en el desarrollo de robots móviles dotados de una mayor autonomía. La mayor parte de las experiencias se desarrollan empleando plataformas que soportan sistemas de visión [1]. Sin embargo el desarrollo tecnológico todavía no era el suficiente para lograr la navegación autónoma de forma eficiente. En los años ochenta se incrementa de forma significativa de la capacidad computacional y el desarrollo de nuevos sensores, mecanismos y sistemas de control, que permite aumentar la autonomía [2].



El sistema de percepción de un robot móvil o vehículo autónomo tiene un triple objetivo: permitir una navegación segura detectando y localizando obstáculos y situaciones peligrosas en general, modelando el entorno, construyendo un mapa o representación de dicho entorno (fundamentalmente geométrica) y estimular la precisión del vehículo de forma precisa. Asimismo, el sistema de percepción de estos robots puede aplicarse no solo para navegar sino también para aplicaciones tales como el control de un manipulador situado en el robot [2].

En la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima se diseña y construye un robot gallito, que es un robot móvil diseñado para poder reventar globos de sus oponentes y defenderse de que sea reventado sus globos. La mayoría de los materiales para la construcción son reciclados, los materiales son resistentes pero a la vez ligeros para que tenga buena movilidad.

La estructura del robot está elaborada por diferentes materiales: un chasis de aluminio, una rampa de acero y una armadura de lámina de acero, tiene dos armas que consiste en aspas que giran, que al acercarse a los globos del oponente los pueda reventar, y la otra es una rampa con alfileres para facilitar la explosión del globo. El robot gallito utiliza sensores ultrasónicos para percibir el movimiento de los contrincantes y para monitorear la distancia que hay desde el robot hasta otro objeto, los sensores infrarrojos para mantener dentro del cuadrilátero al robot y actuadores para el movimiento del robot y del arma. Este artículo está relacionado con la automatización de un robot para controlar los actuadores con la retroalimentación de los sensores.

## 2. Marco Teórico

En esta sección se muestra en forma detallada el funcionamiento de los sensores, actuadores, componentes electrónicos y tarjetas controladoras utilizados en la construcción del robot gallito

### 2.1 Sensor ultrasónico

El sensor ultrasónico emite cíclicamente un impulso acústico de alta frecuencia y corta duración. Este impulso se propaga a la velocidad del sonido por el aire. Al encontrar un objeto, es reflejado y vuelve como eco al sensor ultrasónico. Este último calcula internamente la distancia hacia el objeto, basado en el tiempo transcurrido entre la emisión de la señal acústica y la recepción de la señal de eco.

Como la distancia hacia el objeto es medida por medio del tiempo de recorrido del sonido, y no por una medición de la intensidad, los sensores ultrasónicos son insensibles hacia el ruido de fondo. En la figura 1 se muestra el funcionamiento del sensor ultrasónico. En el robot móvil se utilizan para determinar las distancias de los oponentes.[3]

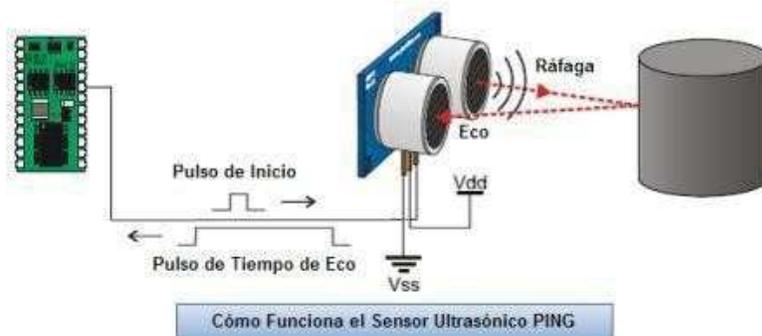


Figura 1. Funcionamiento de Sensor ultrasónico.

## 2.2 Sensor infrarrojo

Un sensor infrarrojo consiste en un emisor de señal infrarroja (un led) y un fototransistor. Si ambos apuntan hacia el mismo lado, tenemos un sensor reflectivo, dado que el fototransistor será estimulado cuando la luz del led se refleje sobre una superficie. Esto es útil para detectar colores muy distintos (por ejemplo, una línea negra sobre un papel blanco) o detectar si el robot está por caer al vacío (el sensor detecta la reflectancia de la mesa, pero al acercarse a un borde deja de recibir la señal), en la figura 2 se puede observar el funcionamiento de los sensores reflectivos [4].

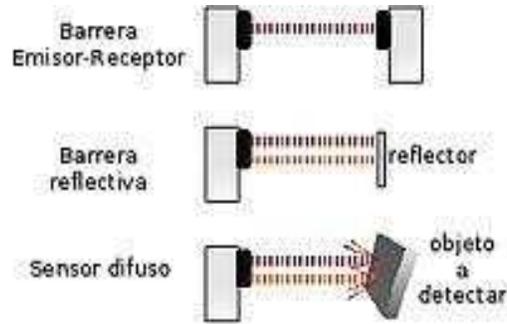


Figura 2. Funcionamiento de Sensor Infrarrojo.

## 2.3 Arduino MEGA

El Arduino Mega es una placa electrónica basada en el ATmega1280. En la figura 3 se muestra una placa de arduino mega la cual cuenta con 54 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 14 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos serie de hardware), un 16 MHz oscilador de cristal, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para apoyar el microcontrolador; basta con conectarlo a un ordenador con un cable USB o la corriente con un adaptador de CA a CC o una batería para empezar. La Mega es compatible con la mayoría de los shield para el Arduino Duemilanove o Diecimila [5].

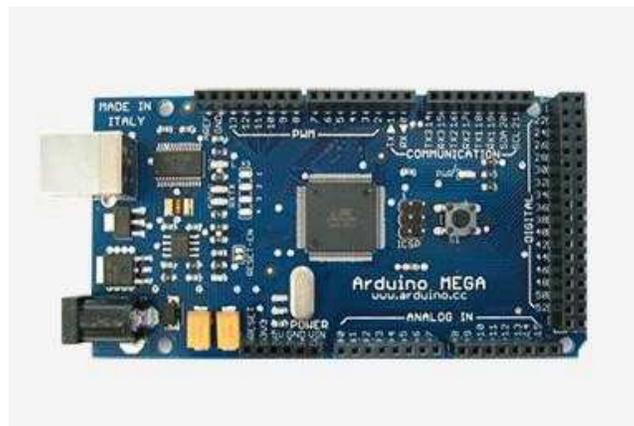


Figura 3. Placa de Arduino MEGA.

## 2.4 Arduino DUE

El Arduino Due es una placa electrónica basada en la CPU Atmel SAM3X8E ARM Cortex- M3. Es la primera placa Arduino basado en un microcontrolador núcleo ARM de 32 bits. En la figura 4 podemos observar que el arduino DUE Cuenta con 54 pines digitales de entrada / salida, de los cuales 12 se pueden utilizar como salidas PWM, 12 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos serie de hardware), un reloj de 84 MHz, una conexión capaz USB OTG, 2 DAC (de digital a analógico), 2 TWI, un conector de alimentación, una cabecera de SPI, un encabezado JTAG, un botón de reinicio y un botón de borrado [5].

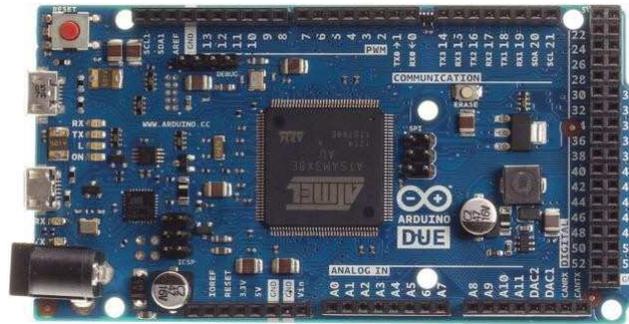


Figura 4. Placa de Arduino DUE.

## 2.5 Puente "H"

El puente H es un circuito electrónico que permite a un motor eléctrico DC girar en ambos sentidos, avanzar y retroceder. Los puentes H ya vienen hechos en algunos circuitos integrados, pero también se pueden construir a partir de componentes discretos, el diseño es mostrado en la figura 5 [6].

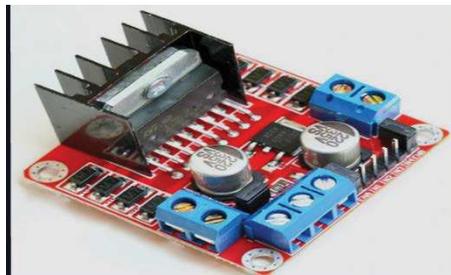


Figura 5. Estructura de un puente H.

## 2.6 Batería Lipo

La batería de polímero de iones de litio, de ion de litio polímero o más comúnmente batería de polímero de litio (abreviadamente LiPo) son pilas recargables, compuestas generalmente de varias células secundarias idénticas en paralelo para aumentar la capacidad de la corriente de descarga, y están a menudo disponibles en serie de "packs" para aumentar el voltaje total disponible, tal como se muestra en la figura 6.



Figura 6. Batería de Lipo.

### 2.7 Motor de CD

Un motor eléctrico de Corriente Continua es esencialmente una máquina que convierte energía eléctrica en movimiento o trabajo mecánico, a través de medios electromagnéticos, tal como se muestra en la figura 7.



Figura 7. Motor de CD.

## 3. Diseño y construcción

En esta sección se muestra el diseño y construcción mecánica del robot gallito, así como su arma para reventar globos, también se describe la parte electrónica y la construcción paso a paso del robot móvil.

### 3.1 Diseño Mecánico del Robot Móvil.

El diseño del robot gallito es realizado en SolidWorks® como se muestra en la figura 8, antes de iniciar la construcción se hace un diseño para ver la factibilidad y la manipulabilidad, se observa que el prototipo tiene dos llantas y una rueda de libre movimiento para que el giro del robot sea rápido, varios sensores ultrasónicos alrededor del robot para la defensa, un arma para reventar los globos de los robots oponentes.

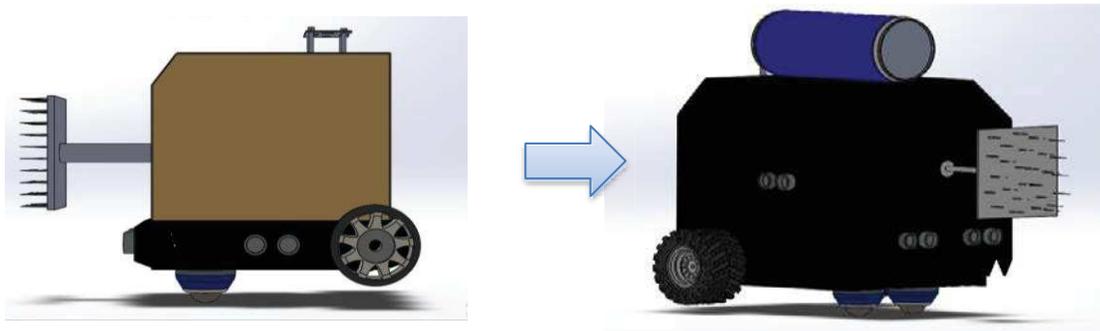


Figura 8. Diseño en del robot gallito en SolidWorks®.

En la figura 8 se observa que los objetos puntiagudos del arma no se encuentran colocados uniformemente debido a que se realizaron pruebas y los globos se revientan fácilmente en esa ubicación. En la figura 9 se muestra de forma detallada las medidas reales del robot gallito, en diferentes vistas del prototipo, las medidas está dada en centímetros, para que el lector pueda diseñar su robot móvil.

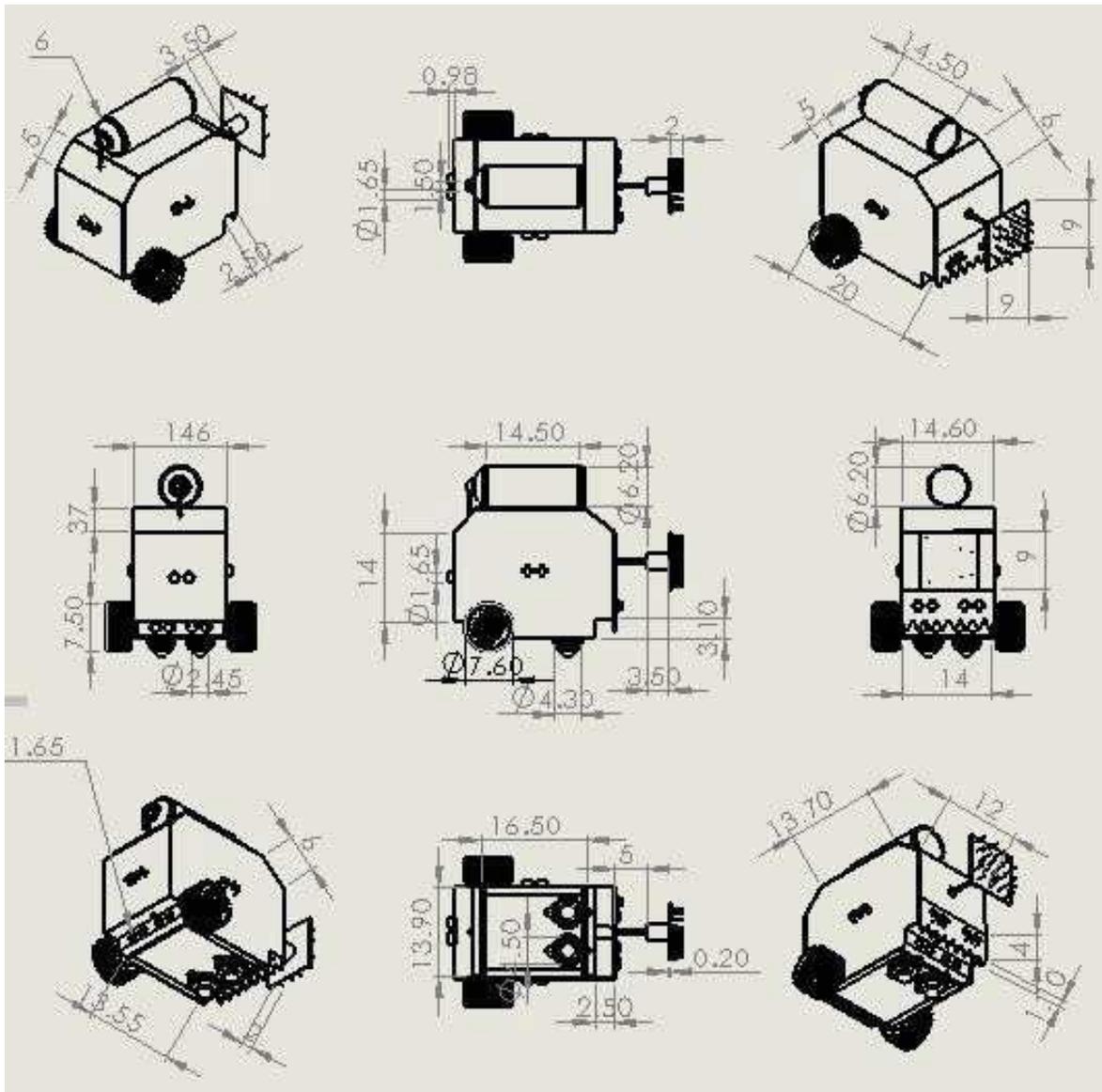


Figura 9. Planos en diferentes vistas del prototipo, medidas en centímetros.

### 3.2 Construcción.

En esta sección se describe a detallada la lista de material empleada para la construcción del prototipo, ver tabla 1. El costo del prototipo es de \$ 4,196.00 pesos y el tiempo de construcción y programación es de aproximadamente de dos meses.



**Tabla 1. Lista de material con costos.**

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Costo</b>
<b>Material Electrónico</b>			
<b>Puente H (LS298)</b>	1	\$ 80.00	\$ 80.00
<b>Cilindro Neumático</b>	1	\$ 580.00	\$ 580.00
<b>Sensor Infrarrojo</b>	4	\$ 25.00	\$ 100.00
<b>Sensor Ultrasónico</b>	6	\$ 30.00	\$ 180.00
<b>Motor CD</b>	2	\$ 430.00	\$ 860.00
<b>Arduino DUE</b>	1	\$ 480.00	\$ 480.00
<b>Arduino MEGA</b>	1	\$ 250.00	\$ 250.00
<b>Baquelita 30x30</b>	1	\$ 125.00	\$ 125.00
<b>Dupont</b>	3	\$ 24.00	\$ 75.00
<b>Lata de Aire Comprimido</b>	2	\$ 68.00	\$ 136.00
<b>Batería LIPO</b>	1	\$ 560.00	\$ 560.00
<b>Material Mecánico</b>			
<b>Chasis</b>	1	\$ 500.00	\$ 500.00
<b>Tornillo con tuercas</b>	20	\$ 2.00	\$ 40.00
<b>Aluminio tramo</b>	1	\$ 230.00	\$ 230.00
<b>Paquetes de remaches</b>	1	\$ 30.00	\$ 30.00
		<b>Total</b>	\$ 4,196.00

En base al esquema mostrado en la figura 9, se hace una descripción del diseño mecánico y construcción del robot gallito, para poder orientar al lector en su construcción de su propio robot móvil. El chasis consta de un cuadro ligero de aluminio. En el chasis son colocadas ruedas de libre movimiento como se muestra en la figura 10 para proporcionar al robot gallito mayor movilidad.



**Figura 10. Chasis con ruedas de libre movimiento.**

Se utilizan placas de aluminio para la construcción de la estructura, ya que es muy ligera y fácil de moldear. Se emplea ángulo de aluminio de 1 pulgada para la unión de todas las piezas de la estructura y se montan en el chasis, así como se muestra en la figura 11.



**Figura 11. Ensamble de piezas al chasis de aluminio.**

Se maquina un cople que es ensamblado al pistón neumático que forma parte del arma. En el cople se monta en una placa de acero 5cm X 5cm y de un grosor de 2mm, tiene objetos objetos puntiagudos que forma parte de la herramienta de ataque, la cual es en encarga de reventar los globos de los robots gallitos contrarios. De esta forma se crea el arma de ataque del robot gallito, como se muestra en la figura 12.



**Figura 12. Arma de ataque de robot gallito.**

Una vez construido el arma de ataque, se ensambla cada una de las partes de la estructura del robot, se hace un orificio en la parte delantera donde se colocó el pistón. El pistón se encuentra acoplado a una base en el interior de la estructura que ayuda a mantenerlo fijo. En la figura 13 se muestra el robot gallito con el arma y con la estructura casi terminada.



**Figura 13. Estructura con arma acoplada.**

Ahora a la estructura se hacen los agujeros para los sensores ultrasónicos y se le coloca alrededor del robot gallito, estos permiten detectar la proximidad de los robots oponentes y diseñar un plan de defensa, en la figura 14 se muestra el prototipo listo.



**Figura 14. Estructura del robot móvil.**

### **3.3 Electrónica del robot gallito.**

En esta sección se muestra el diagrama electrónico para que sirva de guía al usuario y pueda diseñar su propio prototipo. Para posicionar el robot se utilizan sensores ultrasónicos y se desarrolla un programa en la plataforma de arduino. Este está basado en las constantes mediciones que realizan los sensores ultrasónicos para detectar la presencia de los demás robots.

Debido a que los globos que están colocados en la parte trasera, los sensores ultrasónicos son ubicados en las partes laterales del robot y en la parte trasera del mismo, con la finalidad de crear un



plan de defensa. Si el sensor ultrasónico de la izquierda detecta presencia el robot gira hacia la izquierda, lo mismo pasa cuando el sensor derecho detecta algo. Cuando el sensor que está colocado en la parte trasera detecte presencia, el robot girara los 360 grados. En cualquiera de los tres casos el prototipo seguirá girando o avanzando hasta que el sensor de la parte delantera detecte la presencia de otro robot. En la figura 15 muestra de forma detallada la conexión electrónica de los sensores ultrasónicos y los infrarrojos que van conectados al arduino. Las conexiones del arduino a los puentes H y a los motores de cd son mostrados en el diagrama electrónico de la figura 16.

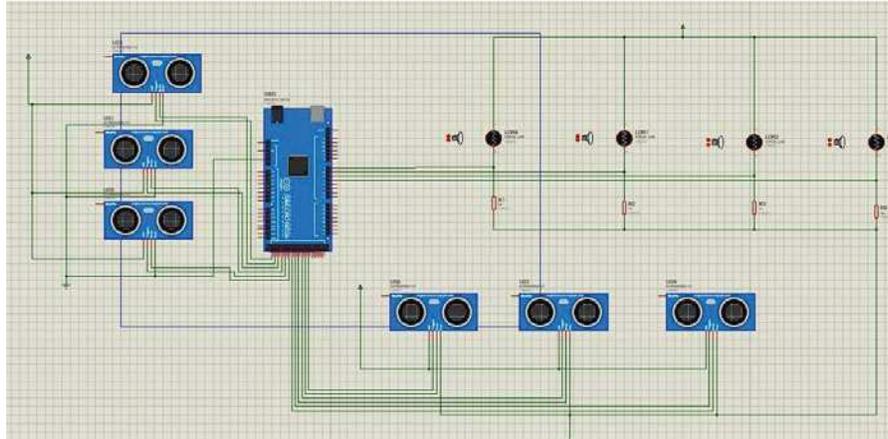


Figura 15. Diagrama de control.

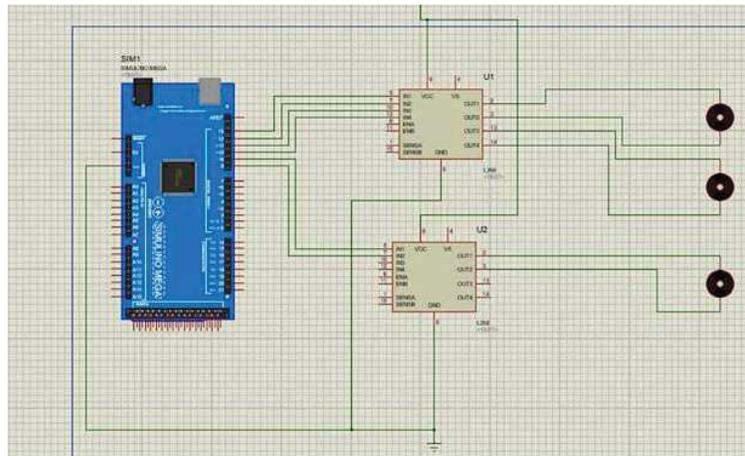


Figura 16. Diagrama electrónico de conexión de los motores.

#### 4. Resultados experimentales

Se deben colocar los sensores del robot, de manera que puedan ser fácilmente ajustables durante el desarrollo de la competición, ya que las condiciones externas de iluminación pueden cambiar, así como otros factores externos que puedan influir sobre los sensores.

El diseño completo del robot móvil se muestra en la figura 17, y cumple con las reglas de competencia de robot gallito. Además, como se observa el robot gallito está completamente terminado, en la parte de enfrente se ve el arma para reventar los globos del oponente, a los costados y en la parte trasera del robot son montados unos sensores ultrasónicos para revisar cuando un robot móvil oponente se aproxima y emplear una estrategia de defensa.

En la figura 18 se observa cinco modelos de robots gallitos, los cuales varían muy poco al diseño mecánico que se propone en este artículo, lo que cambia son las armas de pinchado de globos. Referente al diseño electrónico son muy parecidos, solo cambian el número de sensores y actuadores, de igual forma, la programación de los robots gallitos son muy parecidos, el programa se muestra en el Apéndice A. Como se puede observar en la figura 18, los cinco modelos tienen dos globos antes de iniciar la competencia de robots gallitos FIE 2017.



**Figura 17. Robot gallito**



**Figura 18. Robots gallitos**

Para verificar que el robot está bien construido mecánicamente, así como su electrónica y la programación del mismo, se somete a una competencia de robot gallito, como se muestra en la figura 19.



Figura 19. Competencia del prototipo robot gallito

## 5. Conclusiones

Para fomentar en los estudiantes de Mecatrónica y de la Facultad, la integración de sus habilidades de innovación, destrezas, creatividad, diseño, desarrollo tecnológico, liderazgo, cooperación y coordinación; se diseña y construye un robot móvil que cumpla con las características de competencia de Robot Gallito, motivando así a los estudiantes en crear su propio robot e impulsando el desarrollo de la Región y del País.

El robot móvil se construye con el objetivo de entrar a una competencia de Robots Gallitos organizado por el área de Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima. El diseño mecánico del prototipo fue mostrado en Capítulo 3 a detalle, el cual debe ser robusto y ligero. El usuario debe seleccionar llantas que tengan una excelente tracción para que soporten la embestida de los robots oponentes. El robot gallito de este trabajo se le diseñó y construyó un arma de la época medieval para pinchar los globos de los contrarios. Referente al software, se programó un algoritmo de control en arduino como se observa en el Apéndice A, que es soportado con una buena electrónica como se observa en el Capítulo 3.

El robot gallito es diseñado y construido a conciencia, con materiales reciclados para el cuidado del ambiente y los recursos económicos, este robot quedo en primer lugar en la competencia de Robots Gallitos 2017. Se concluye que la propuesta del diseño mecánico, electrónico y la programación del robot móvil funcionan correctamente, por lo que el lector puede seguir como una guía este artículo, para la construcción de su propio robot gallito.

## Referencias

- [1] Moravec, H. "*Robot rover visual navigation*". UMI Research Press. 1981.
- [2] Ollero, A. "*Robótica Manipuladores y robots móviles*". Editorial Alfaomega marcombo. 2007.
- [3] Bolton, W.. "*Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en ingeniería mecánica y eléctrica*", Editorial Alfaomega, México, 2001.
- [4] Cetinkunk, S. "*Mecatrónica*". Editorial Patria, México. 2007.
- [5] Massimo, B. y Shioh, M. "*Introducción a Arduino*". Editorial Anaya Multimedia, México. 2016.
- [6] Mohan, N., Undeland, T. y Robbins, W. "*Electrónica de potencia: Convertidores, aplicaciones y diseño*". Editorial McGraw-Hill, México. 2009.



## Apéndice A. Programa del Arduino

```
//Se declara los pines para el 1 camina adelante
const int led = 8;
const int trig = 22;
const int echo = 23;
// Se declara los pines para el 2 camina atrás
const int led2 = 7;
const int trig2 = 24;
const int echo2 = 25;
// Se declara los pines para el 3 derecha
const int led3 = 5;
const int trig3 = 26;
const int echo3 = 27;
// Se declara los pines para el 4 izquierda
const int led4 = 6;
const int trig4 = 28;
const int echo4 = 29;
// Se declara los pines para el 5 igual como 1
const int trig5 = 30;
const int echo5 = 31;
// Se declara los pines para el 6 igual como 2
const int trig6 = 32;
const int echo6 = 33;
// Se declara variables auxiliares
long tiempo;
long tiempo2;
long tiempo3;
long tiempo4;
long tiempo5;
long tiempo6;
long distancia;
long distancia2;
long distancia3;
long distancia4;
long distancia5;
long distancia6;
//Variables del sensor infrarrojo
int rgb = 9;
int rgb2 = 10;
int rgb3 = 11;
int rgb4 = 12;
int lectura;
int lectura2;
int lectura3;
int lectura4;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  //ultrasonico 1
  pinMode(trig, OUTPUT);
  pinMode(echo, INPUT);
  pinMode(led,OUTPUT);
  //ultrasonico 2
  pinMode(trig2, OUTPUT);
  pinMode(echo2, INPUT);
  pinMode(led2,OUTPUT);
  //ultrasonico 3
  pinMode(trig3, OUTPUT);
  pinMode(echo3, INPUT);
  pinMode(led3,OUTPUT);
  //ultrasonico 4
  pinMode(trig4, OUTPUT);
  pinMode(echo4, INPUT);
  pinMode(led4,OUTPUT);
  //ultrasonico 5
  pinMode(trig5, OUTPUT);
  //ultrasonico 6
  pinMode(trig6, OUTPUT);
  pinMode(echo6, INPUT);
  pinMode(rgb, INPUT);
  pinMode(rgb2, INPUT);
  pinMode(rgb3, INPUT);
  pinMode(rgb4, INPUT);
}
void loop() {
  //sensor infrarrojo
  lectura=digitalRead(rgb);
  lectura2=digitalRead(rgb2);
  lectura3=digitalRead(rgb3);
  lectura4=digitalRead(rgb4);
  Serial.println("Infrarrojo 1");
  Serial.println(lectura);
  Serial.println("Infrarrojo 2");
  Serial.println(lectura2); Serial.println("Infrarrojo 3");
  Serial.println(lectura3);
  Serial.println("Infrarrojo 4")
  Serial.println(lectura4);
  //ultrasonico 1 adelante
  digitalWrite(trig, LOW); delayMicroseconds(5);
  digitalWrite(trig, HIGH); delayMicroseconds(10);
  tiempo = pulseIn(23, HIGH);
  distancia = int(0.017*tiempo);
  //Serial.println(distancia); Serial.println("Sup.
  Izquierdo"); Serial.println(distancia);
  //delay(1000);
  //-----
  //ultrasonico 2 atrás
  digitalWrite(trig2, LOW);
  delayMicroseconds(5);
  digitalWrite(trig2, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  tiempo2 = pulseIn(25, HIGH);
  distancia2 = int(0.017*tiempo2);
  //Serial.println(distancia2);
  Serial.println("Inf. Derecho");
  Serial.println(distancia2);
  //delay(1000);
  //-----
  //ultrasonico 3 derecha
  digitalWrite(trig3, LOW);
  delayMicroseconds(5);
  digitalWrite(trig3, HIGH); delayMicroseconds(10);
  tiempo3 = pulseIn(27, HIGH);
  distancia3 = int(0.017*tiempo3);
  Serial.println("Izquierdo"); Serial.println(distancia3);
  //delay(1000);
  //-----
  //ultrasonico 4 izquierda
  digitalWrite(trig4, LOW); delayMicroseconds(5);
  digitalWrite(trig4, HIGH); delayMicroseconds(10);
  tiempo4 = pulseIn(29, HIGH);
```



```
    distancia4 = int(0.017*tiempo4);
Serial.println("Derecho"); Serial.println(distancia4);
    //delay(1000);
//-----
//ultrasonico 5 adelante
digitalWrite(trig5, LOW); delayMicroseconds(5);
digitalWrite(trig5, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    tiempo5 = pulseIn(31, HIGH);
distancia5 = int(0.017*tiempo5); Serial.println("Sup.
Derecho");
Serial.println(distancia5);
//delay(1000);
//-----
//ultrasonico 6 atrás
digitalWrite(trig6, LOW);
    delayMicroseconds(5);
digitalWrite(trig6, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    tiempo6 = pulseIn(33, HIGH);
    distancia6 = int(0.017*tiempo6); Serial.println("Inf.
Izquierdo");
Serial.println(distancia6);
//delay(1000);
//-----
//condiciones de los sensores infrarojos
if(lectura==0 && lectura2==0 && lectura3==1 &&
lectura4==1)
{
    atras(); delay(1000); derecha();
}
if(lectura==1 && lectura2==1 && lectura3==0 &&
lectura4==0)
{
    adelante();
}
if(lectura==0 && lectura2==1 && lectura3==1 &&
lectura4==1)
{
    atras(); delay(500); derecha();
}
if(lectura==1 && lectura2==0 && lectura3==1 &&
lectura4==1)
{
    atras(); delay(500); izquierda();
}
if(lectura==1 && lectura2==1 && lectura3==0 &&
lectura4==1)
{
    adelante();
}
if(lectura==1 && lectura2==1 && lectura3==1 &&
lectura4==0)
{
    adelante();
}
if(lectura==1 && lectura2==1 && lectura3==1 &&
lectura4==1)
{
    if( distancia > 20 && distancia2 < 20 || distancia6 < 20
&& distancia3 > 20 && distancia4 > 20 && distancia5 >
20 ){
        atras();//digitalWrite(led,HIGH);
    }
    if( distancia < 20 || distancia5 < 20 && distancia2 >
20 && distancia3 > 20 && distancia4 > 20 &&
distancia6 > 20 ){
        adelante();//digitalWrite(led,HIGH);
    }
    if( distancia > 20 && distancia2 > 20 && distancia3 <
20 && distancia4 > 20 && distancia5 > 20 &&
distancia6 > 20 )
    {
        izquierda();//digitalWrite(led,HIGH);
    }
    if( distancia > 20 && distancia2 > 20 && distancia3 >
20 && distancia4 < 20 && distancia5 > 20 &&
distancia6 > 20 )
    {
        derecha();//digitalWrite(led,HIGH);
    }
    if( distancia > 20 && distancia2 > 20 && distancia3 >
20 && distancia4 > 20 && distancia5 > 20 &&
distancia6 > 20 )
    {
        parar();//digitalWrite(led,HIGH);
    }
}
}
}
void adelante()
{
    digitalWrite (led, HIGH);
    digitalWrite (led2, LOW);
    digitalWrite (led3, HIGH);
    digitalWrite (led4, LOW);
}
void atras()
{
    digitalWrite (led, LOW);
    digitalWrite (led2, HIGH);
    digitalWrite (led3, LOW);
    digitalWrite (led4, HIGH);
}
void derecha()
{
    digitalWrite (led, HIGH);
    digitalWrite (led2, LOW);
    digitalWrite (led3, LOW);
    digitalWrite (led4, HIGH);
}
void izquierda()
{
    digitalWrite (led, LOW);
    digitalWrite (led2, HIGH);
    digitalWrite (led3, HIGH);
    digitalWrite (led4, LOW);
}
void parar()
{
    digitalWrite (led, LOW);
    digitalWrite (led2, LOW);
    digitalWrite (led3, LOW);
    digitalWrite (led4, LOW);
}
}
```



# Sistema de monitoreo en arquitectura abierta para una mano con tres dedos articulados

Alcalá Rodríguez Janeth Aurelia, Gudiño Lau Jorge, Charre Ibarra Saida Miriam,  
Hernández Barón Eduardo

Facultad de Ingeniería Electromecánica – Universidad de Colima  
Carretera Manzanillo – Barra de Navidad Km 20  
Manzanillo, Colima, México

## Resumen

*Los métodos y técnicas de rehabilitación para pacientes con problemas en las extremidades superiores, como lo es el caso particular de las manos son una parte fundamental y necesaria para establecer el mecanismo de recuperación que pueden alcanzar los pacientes, por ello en este trabajo se propone el diseño e implementación de una mano robótica con tres dedos articulados, dentro de los alcances se establece el construir un sistema en arquitectura abierta que consta: 1) del prototipo para una mano con tres dedos articulados y 2) de una plataforma que permitirá visualizar para manipular y monitorear los grados eléctricos del movimiento.*

**Palabras clave:** Mano robótica, sistema de monitoreo, arquitectura abierta.

## 1. Introducción

La elección de la prótesis adecuada para las personas que han sufrido pérdida de este miembro es fundamental y para la elección se debe considerar el nivel de amputación o el tipo de displasia que se requiera tratar. Las prótesis más usadas en la actualidad tienen el diseño de una pinza actuada mecánicamente con el musculo colateral; sin embargo no aseguran la movilidad tal como una mano sana dado que sólo permite un tipo de prensión y dependiendo de los requerimientos de cada paciente, se decide el tipo de dispositivo que mejor se adapte a sus características y necesidades. Por lo que cada vez son más las investigaciones que buscan técnicas para el diseño adecuado de la arquitectura la mano, la mayoría de ellos con un fin común, el de aumentar el desempeño de la mano robótica, tal que se asemeje en la medida de lo posible al de una mano humana sana.

Un campo que ha cobrado relevancia en los últimos años, es el de las prótesis mioeléctricas, ya que permiten al usuario manipular objetos a través de una mano mecánica con la ayuda de diversos sensores. Esto ha generado que se propongan diseños más eficientes en manos robóticas emulando la mano humana y que son manipuladas a través de una computadora.

[1] desarrollaron una mano robótica con tres dedos, cada dedo tenía 9 articulaciones. En el trabajo propuesto se analizan las ecuaciones cinemáticas y dinámicas que describen el movimiento de la mano robótica Stanford/JPL. Por otro lado [2] verifican experimentalmente la calibración en lazo cerrado de la mano UTAH/MIT, considerando un dedo de la mano opuesto al dedo pulgar, de manera que las yemas de los dedos estén conectadas, cada dedo contaba con 4 grados de libertad, por lo que el sistema tenía 8 grados de libertad.

A medida que las investigaciones avanzan, los prototipos propuestos son cada vez más elaborados y de mayor complejidad; por lo que la operación de manos robóticas con capacidades similares a la mano humana, más que un sueño es ya una realidad. En [3] se discute el mecanismo y diseño de una nueva mano de tipo humanoide llamada TUAT/KARLSRUHE que cuenta con habilidades de manipulación del tipo humano. En [4] se propone usar redes neuronales, esta



propuesta es para detectar la contracción de los músculos flexores y extensores de los dedos. Por otro lado, para el desarrollo de controladores se tiene que tomar en cuenta el peso máximo de la mano robótica, puesto que no debe exceder los 450 gramos [5] para que el usuario no tenga problemas de movilidad al momento de manipular la mano y logre el agarre de objetos adecuadamente. Una de las técnicas para cumplir con este requisito es el diseño de una mano subactuada. En [6] se diseñó una prótesis con tres grados de libertad que cuenta con tres dedos subactuados los cuales son manipulados por motores de corriente directa (CD) emulando los músculos extrínsecos de una mano humana.

Los métodos y técnicas de rehabilitación para pacientes con problemas en las extremidades superiores, como lo es el caso particular de las manos son una parte fundamental y necesaria para establecer el mecanismo de recuperación que pueden alcanzar los pacientes, por ello en este trabajo se propone el diseño e implementación de una mano robótica, dentro de los alcances se establece el que la mano pueda reproducir los movimientos del paciente bajo estudio. El prototipo se puede utilizar en el campo/estudio de las prótesis o de manera aislada, para simular y estudiar sus movimientos a través de sensores de fuerza y posición de los dedos.

En este documento se muestran los primeros resultados de un proyecto que tiene como meta diseñar y construir una mano robótica que pueda reproducir los movimientos de la mano humana al recibir señales. Se plantea como objetivo inmediato, el diseño y construcción de una mano con solamente tres dedos: medio, índice y pulgar. Añadiendo un grado de libertad que simula la función del metacarpiano del dedo pulgar. Para el diseño mecánico se utiliza el software SolidWorks® y se diseñan de manera individual las partes de los dedos pulgar, índice y medio, así como la de la palma y el metacarpiano del dedo pulgar. Además, se diseña una plataforma de manipulación externa para manipular los movimientos de la mano.

## 2. Diseño de la mano con tres dedos articulados

La parte más importante del cuerpo del ser humano es el órgano terminal de la extremidad superior, es decir la mano, por la funcionalidad que brinda y dado que es sensitiva y permite realizar múltiples movimientos y acciones que son necesarias para la manipulación de objetos [7].

### 2.1 Anatomía de la mano

La mano humana está compuesta de 27 huesos divididos en tres grupos: 8 carpianos, 5 metacarpianos y 14 falanges que se conectan a la muñeca a través de la palma. En la figura 1 se muestra la visión posterior dorsal de la estructura ósea de la mano izquierda y se pueden identificar estos tres grupos.

Los dedos están compuestos por tres falanges (distal, intermedia y proximal), a excepción del dedo pulgar que solo tiene dos (distal y proximal). El dedo pulgar esta fijo por debajo de los otros dedos y puede realizar los movimientos de cierre y rotación, debido a la gran movilidad de su metacarpo. La longitud de las falanges incrementa conforme se acercan a los metacarpianos, es decir, la falange distal es de menor longitud mientras que la falange proximal es la más larga de las tres.

Por otra parte, el movimiento de los dedos se mide en términos del grado máximo de flexión hasta el grado máximo de extensión, es importante resaltar que la hiperextensión se mide con un ángulo negativo, por lo tanto, el rango total del movimiento de cada uno de los dedos se determina restando el ángulo de extensión del ángulo de flexión.

Particularmente, el metacarpo permite variar la orientación del movimiento para doblar y extender el dedo pulgar, propiedad a través de la cual es posible posicionar el dedo pulgar con los otros dedos. El dedo pulgar se considera el más importante ya que permite realizar la función conocida como *pinza pulgar-dedos*, sin él, los movimientos de los dedos constituirían solo prensiones globales en vez de movimientos precisos [7]. Para ejemplificar los movimientos que el dedo pulgar puede realizar se utilizan las figuras 2a-2d.

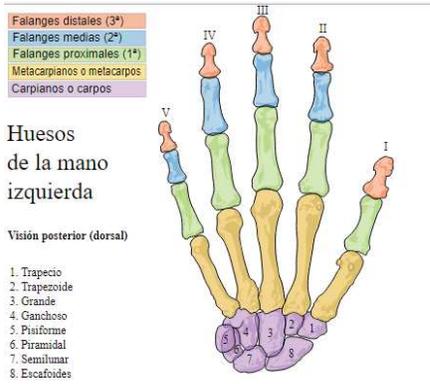


Figura 1. Anatomía de la mano.

En la figura 2a se muestra el movimiento de *abducción-extensión*, este movimiento permite separar el dedo pulgar del eje de la mano y el arco de movilidad es de 35 a 40 grados eléctricos, básicamente este movimiento abre la mano. El movimiento conocido como *aducción* permite aproximar el dedo pulgar al eje de la mano, como se muestra en la figura 2b y su arco de movilidad también es de 35 a 40 grados eléctricos. Por otro lado, la *oposición* mostrada en la figura 2c, es el movimiento de prensión o cierre de la mano y su arco de movilidad es de 45 a 60 grados eléctricos. Por último, la *reposición* devuelve el dedo pulgar a su posición inicial de partida y su amplitud es igual a la del movimiento precedente, como se muestra en la figura 2d.

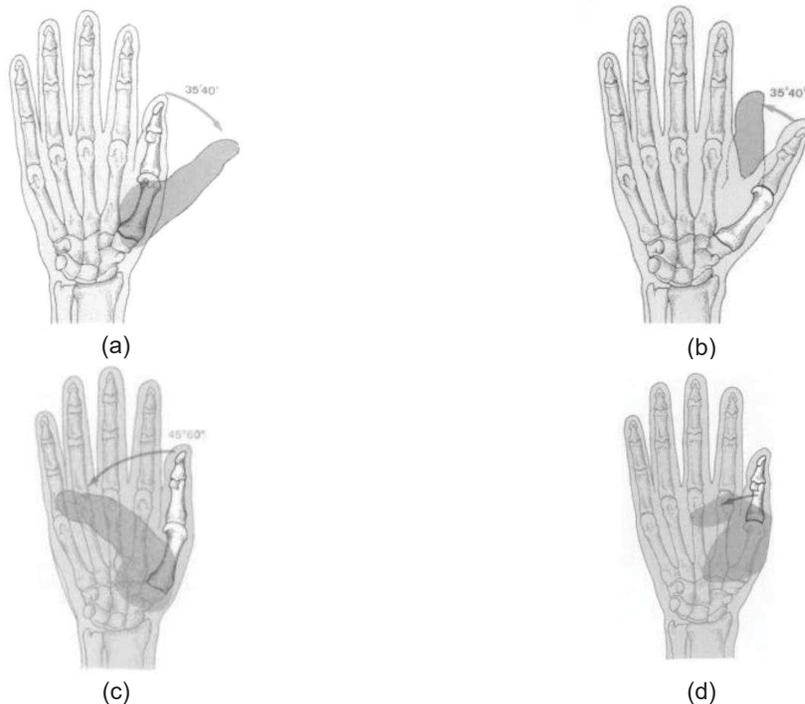


Figura 2. Movimientos del dedo pulgar: (a) abducción, (b) aducción, (c) oposición y (d) reposición.

Cuando se sujeta un objeto el cerebro elige la forma más adecuada y cómoda para hacerlo y de la sujeción se desprenden el tipo de prensión y la adaptabilidad.

Básicamente la mano realiza seis prensiones y de ellas se derivan otras combinaciones. Por otro lado, la adaptabilidad es la capacidad de la mano para tomar la forma del objeto que está sujetando y se relaciona directamente con la proporción del área en contacto. Por lo que al haber una mejor adaptabilidad las fuerzas producidas en las distintas zonas de contacto se distribuyen y minimizan, además la sujeción del objeto es más segura.

En las prótesis de mano es importante cumplir de la mejor manera posible con estas dos características, ya que, por un lado, una prótesis que pueda realizar seis prensiones se puede decir que es “mejor” que una que sólo realice tres, y por otro lado, una prótesis con una mayor adaptabilidad en sus dedos requerirá menos fuerza para sostener un objeto y lo hará de una manera más segura que una prótesis con poca o nula adaptabilidad. Es importante resaltar que la adaptabilidad no está presente sólo en los dedos, la palma juega un papel indispensable cuando se está sujetando un objeto, es por eso que se debe tener presente la forma de la palma durante el diseño de la prótesis.

Refiriéndose particularmente a las prótesis de mano, se identifican dos tipos de grados de acuerdo a la funcionalidad: los grados de libertad también llamados *DOF* (por sus siglas en inglés, *degree of freedom*) y los grados de movilidad o *DOM* (por sus siglas en inglés, *degree of movement*). Los *DOF* indican el total de articulaciones de la prótesis (figura 3a). Por otro lado, los *DOM* indican la cantidad de articulaciones accionadas por actuadores (figura 3b). Por ejemplo, un dedo con tres articulaciones posee tres *DOF* y un *DOM*.

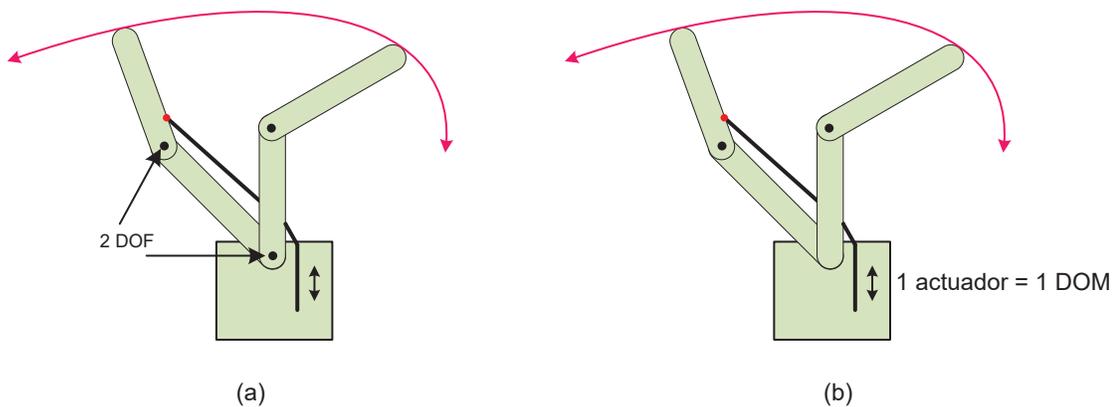


Figura 3. Representación de los grados de operación en la mano: (a) grados de libertad, (b) grados de movimiento.

Cuando en un mecanismo hay menos actuadores que *DOF* se dice que el sistema es *subactuado*. El nivel de subactuación (*UL*) se define como:

$$UL = DOF - DOM \quad (1)$$

Por otro lado, cuando un mecanismo tiene más actuadores que *DOF* se dice que es un mecanismo *sobreactuado*. En el diseño de prótesis de mano, particularmente en los dedos, la subactuación es importante y deseable debido a que se pueden utilizar menos actuadores para lograr resultados similares en cuanto a movimiento, logrando beneficios inmediatos como disminución del peso, menor consumo energético, menos parámetros a controlar, entre otros. Sin embargo, un excesivo grado de subactuación conduce a resultados no deseables como pérdida de precisión y control en los movimientos.



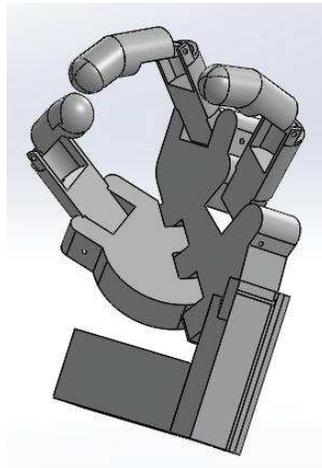
Una característica deseable en el diseño de prótesis es que el pulgar tenga por lo menos dos *DOF* en el pulgar, uno para flexionarlo y otro para realizar la oposición con respecto a la palma. Las prótesis que solo tienen un *DOF* en el pulgar ven disminuida considerablemente su capacidad para sujetar objetos.

Los diseñadores de prótesis se han enfocado en seleccionar materiales sólo para la estructura o para los mecanismos de transmisión de la prótesis. Estos materiales van desde metales como acero o aluminio hasta materiales compuestos como fibra. E aquí otro de los grandes problemas al que se enfrenta el diseño de una prótesis, ya que el material deberá ser muy resistente pero no muy pesado.

## **2.2 Prototipo propuesto para la mano con tres dedos articulados**

Como primera etapa del proyecto se contempló el diseño del prototipo para la mano tomando en consideración todas las características mencionadas anteriormente, sin embargo, es indispensable intercambiar algunas características por otras, es decir es posible tener un modelo más simple de controlar disminuyendo los grados de libertad, pero con ello se sacrifica el rango de movilidad, o parte de él.

La propuesta de diseño en este trabajo se muestra en la figura 4. El prototipo cuenta con tres dedos articulados: medio, índice y pulgar, cada uno cuenta con dos falanges. Como propuesta dentro del diseño se añadió un grado de libertad en la palma y simula la función del metacarpiano del dedo pulgar.



**Figura 4. Mano en presión entre el pulgar y dedo índice.**

Con este tipo de estructura se pueden lograr los movimientos funcionales más utilizados en las tareas cotidianas como es el agarre de pinza, cilíndrico, esférico palmar, lateral y gancho. La desventaja de este diseño es que la articulación interfalángica distal de los dedos índice y medio se suprimió, y en su lugar se fija la falange distal y media, sujetando la falange distal con un ángulo de  $255^\circ$  respecto a la falange media. Por lo tanto los 3 dedos constarán de dos *DOF* y dos *DOM* cada uno; añadiendo un grado de libertad y de movimiento extra en el metacarpiano del dedo pulgar. Para el diseño del prototipo se utilizó el software SolidWorks®, se diseñaron de manera individual las partes de los dedos pulgar, índice y medio, así como la de la palma y el metacarpiano del dedo pulgar.

### 2.2.1 Dedo pulgar

El prototipo del dedo del pulgar consta de dos piezas: la falange distal y la proximal. La falange distal, tiene una longitud de 3.25 cm desde la pestaña de conexión, hasta la uña, y un diámetro en la circunferencia mayor de 2.41cm, como se muestra en la figura 5.

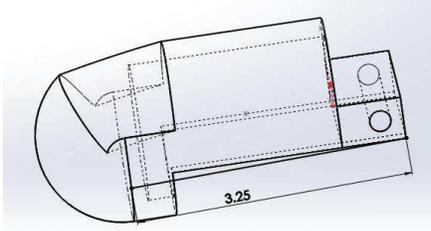
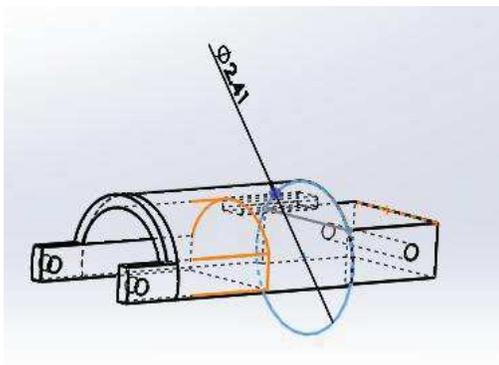
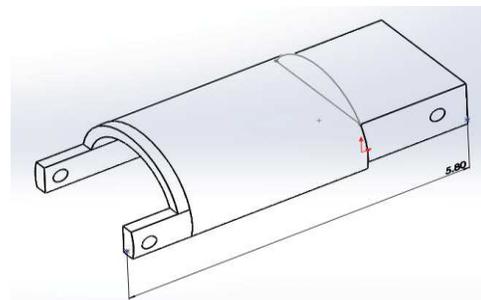


Figura 5. Falange distal del dedo pulgar.

La segunda pieza del dedo pulgar, consta de la falange proximal con un diámetro de 2.41 cm en su circunferencia mayor (figura 6a), y una longitud total de 5.8 cm. (figura 6b).



(a)



(b)

Figura 6. Falange proximal del dedo pulgar.

Al ensamblar las falanges distal y proximal se forma al dedo pulgar, en la Figura 7 se muestra el dedo pulgar ensamblado.

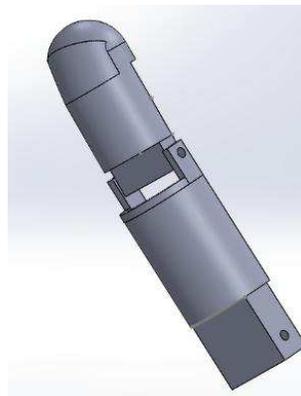


Figura 7. Dedo pulgar ensamblado.

### 2.2.2 Dedo índice

El prototipo del dedo índice consto de dos piezas, una que une la falange distal y media; y una otra pieza para la falange proximal, la cual tiene las mismas dimensiones que la homóloga utilizada en el dedo pulgar.

La pieza formada por las falanges distal y media del dedo índice, tiene una longitud de 3 cm para la sección correspondiente a la falange media (figura 8a) y una longitud de 2.5 cm. correspondientes a la sección de la falange distal (figura 8b).

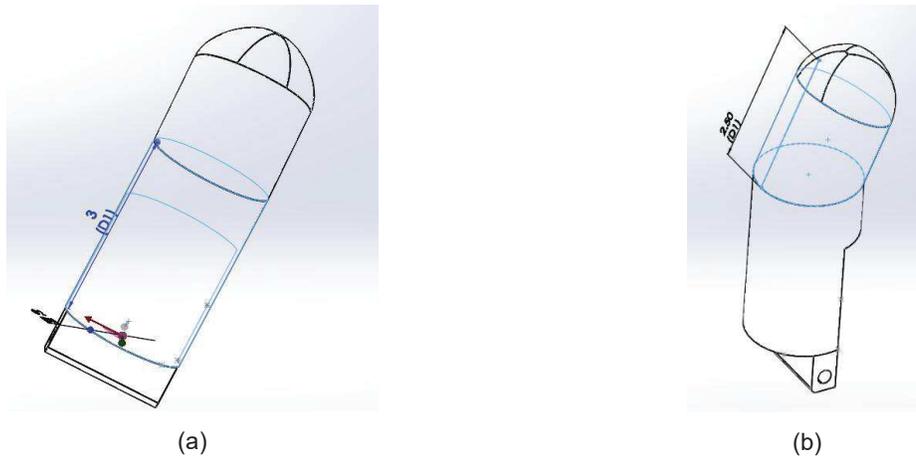


Figura 8. Falange del dedo índice. (a) media, (b) distal.

Cabe destacar que la pieza distal-media no es completamente recta, la falange distal tiene una inclinación de  $25^\circ$  con respecto a la falange media. Además, estas dos falanges disminuyen su diámetro con respecto al del dedo pulgar hasta los 2 cm como se muestra en la figura 9.

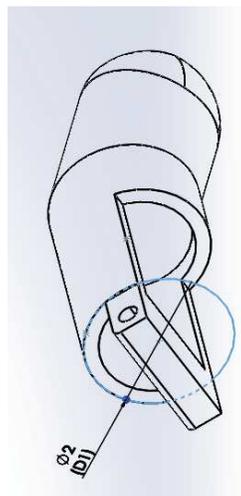
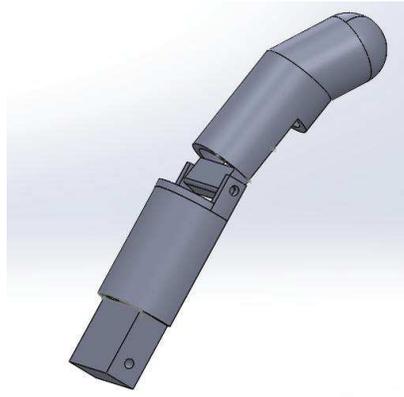


Figura 9. Falange proximal de dedo medio.

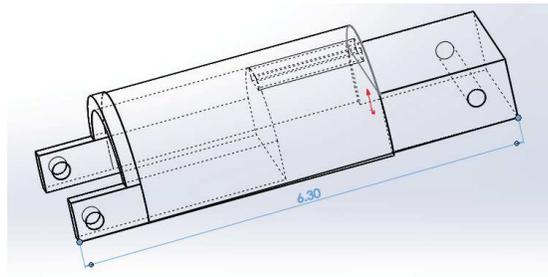
Una vez diseñadas las piezas individuales, se ensamblaron para generar el dedo índice, el cual se puede observar en la figura 10.



**Figura 10. Dedo índice ensamblado.**

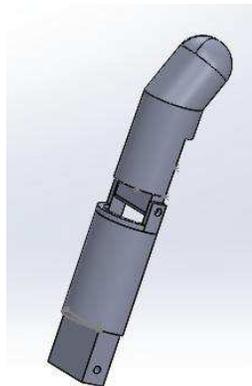
### **2.2.3 Dedo medio**

El procedimiento que sigue para el dedo medio es similar a los anteriores. El prototipo del dedo medio consta de dos piezas también, una que une la falange distal y media, con dimensiones similares al dedo índice, y una segunda pieza para la falange proximal que se diseñó 0.5 cm más larga que la de la falange proximal del dedo índice, como se muestra en la figura 11.



**Figura 11. Falange proximal del dedo medio.**

Una vez diseñada la falange proximal del dedo medio, se realizó un ensamble con la pieza distal-media, obteniendo el prototipo del dedo medio como se muestra en la figura 12.



**Figura 12. Dedo medio ensamblado.**

### 2.2.4 Diseño de la palma

Para el diseño de la palma, se tomaron en cuenta dos piezas, el metacarpo del dedo pulgar, el cual tiene un grado de libertad, y una parte estática. En la figura 13 se puede observar la pieza que simula al metacarpo correspondiente al dedo pulgar. En un extremo cuenta con dos pestañas en las cuales se ensambla el dedo pulgar, mientras en el otro se encuentran otro par para realizar el ensamble con el resto de la palma. La segunda pieza se diseñó con las pestañas de conexión para el metacarpo con el dedo índice y medio, como se puede observar en la Figura 14. En la figura 15 se muestra las partes ensambladas.

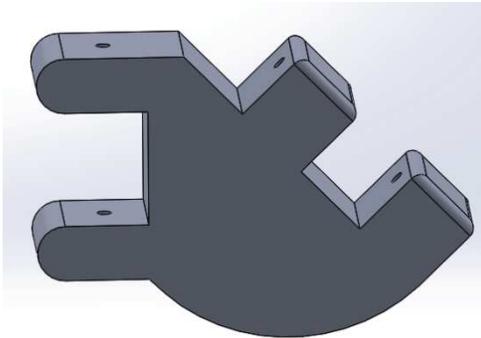


Figura 13. Vista frontal del metacarpo.

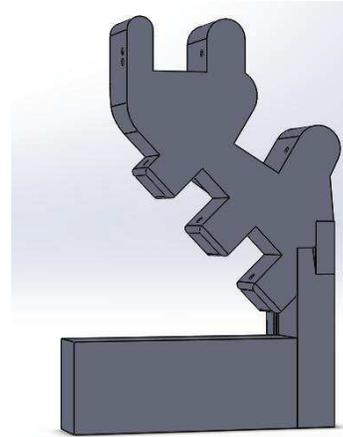


Figura 14. Vista frontal del carpo.

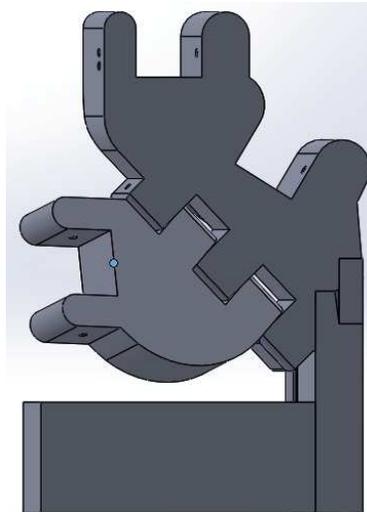


Figura 15. Metacarpo y carpo acoplados.

En la Figura 16 y 17 se muestra el prototipo completo para la estructura de la mano. Las pestañas incluidas para la conexión del dedo medio, se realizaron con una inclinación de  $31.41^\circ$  con respecto a las pestañas del dedo índice, esto para evitar que los dedos índice y pulgar se movieran de forma paralela. En la parte inferior de la palma se colocó un prisma rectangular que sirve como soporte en el ensamble de la mano, las medidas son 10.16 cm de largo x 3.39 cm de alto y 2.08 cm de grosor. Además, en la parte posterior de la estructura, se colocaron dos ductos que funcionan como guías para los tendones de cada uno de los motores.

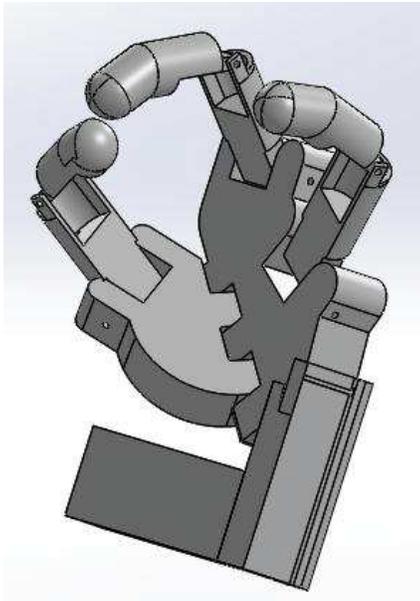


Figura 16. Vista lateral izquierda de la mano ensamblada.

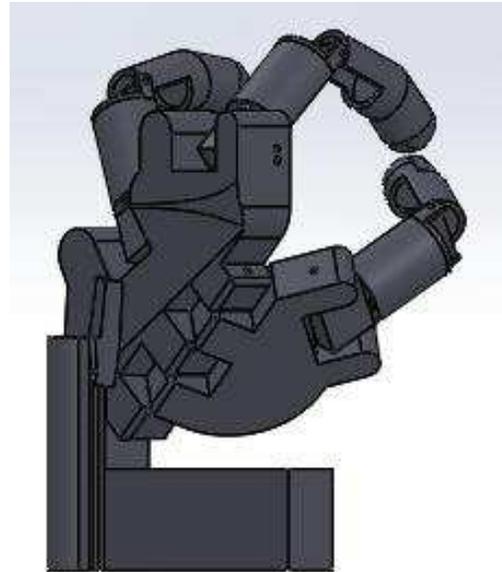


Figura 17. Vista lateral derecha de la mano ensamblada.

### 2.3 Prototipo experimental

La mano robótica completa se imprimió en una impresora 3D, con material ácido poliláctico (PLA), ya que es un polímero biodegradable que se fabrica a partir de recurso renovables al 100%. Además, es resistente a la humedad, a fluidos densos y es liviano. Con este diseño se facilita el movimiento de los dedos articulados, el prototipo final se muestra en las figuras 18 y 19, respectivamente.



Figura 18. Vista frontal del prototipo para la mano ensamblado.

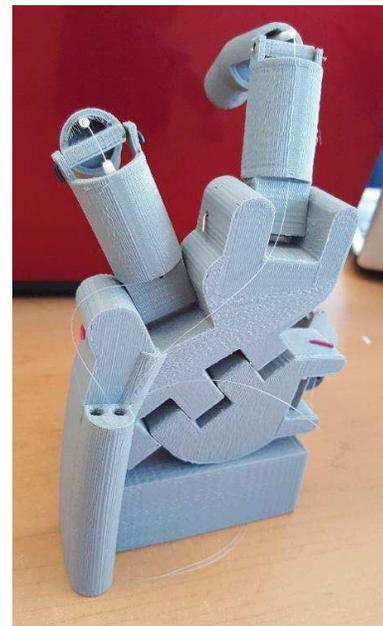


Figura 19. Vista posterior del prototipo para la mano ensamblado.

### 3. Resultados

#### 3.1 Interfaz en arquitectura abierta para manipulación de la mano articulada

Uno de los objetivos principales de este trabajo de investigación, es medir y monitorear las diferentes magnitudes que interactúan con la mano robótica. Para realizar los movimientos de los dedos se utilizaron 7 motoredutores modelo N20, en la tabla 1 se muestran las principales características.

**Tabla 1. Parámetros de los motoredutores N20.**

Parámetros	Valores
Corriente máxima suministrada	40mA-200mA
Voltaje de alimentación	3-12 Vcd
Torque	1.2 kg/cm
Revoluciones por minuto	100 rpm a 6Vcd

De los 7 motoredutores, 2 se utilizaron para manipular el dedo medio, 2 para el dedo índice y 3 para el dedo pulgar. Para colocarlos, se realizó una pequeña estructura de acrílico y se colocó en la parte inferior de la mano, y sobre ella se montaron los 7 motoredutores, como se puede apreciar en la figura 20, colocados de tal forma que sus ejes quedaran en dirección a las articulaciones que debían mover cada uno de ellos.



**Figura 20. Estructura base para los motoredutores.**

Para enviar las señales de control a los motoredutores se utilizó el circuito integrado L293D, el cual contiene dos puentes H, cada uno con diodo de protección. Cada puente H soporta una corriente máxima de 600 mA, y se utilizaron 4 circuitos integrados para manejar los 7 motores del prototipo. En la figura 21 se muestra la tarjeta de control para los motoredutores. Las terminales mostradas en la parte superior corresponden a las entradas de las señales de control para los motores, mientras que la línea de terminales de la parte inferior, corresponde a las salidas, en las cuales van conectadas las terminales de cada uno de los motores. Para conocer la posición de los dedos y la manipular las articulaciones se desarrolló un control en lazo abierto, utilizando modulación por ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés, *Pulse Width Modulation*).

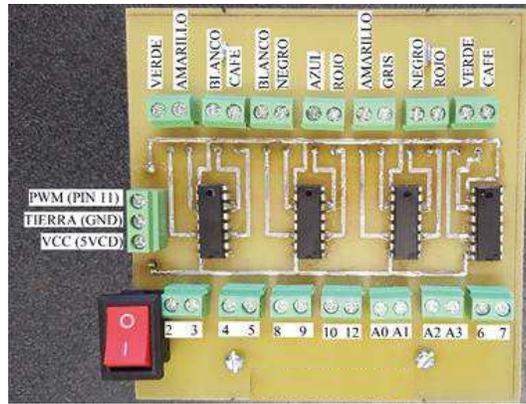


Figura 21. Tarjeta de control para los motoreductores.

En la tabla 2 se especifican que parte de cada dedo corresponde cada uno de los pines de control (2-12, A0 – A3).

Tabla 2. Parámetros de referencia para cada falange.

Dedo	Pines		
	Falange distal/media	Falange proximal	Metacarpo
Pulgar	2,3	4,5	6,7
Índice	8,9	10,12	--
Medio	A0-A1	A2,A3	--

Para medir y monitorear las diferentes magnitudes físicas con las que interactúa el prototipo se utilizaron flexómetros de 2.2 pulgadas de longitud en cada uno de los dedos para determinar la posición de los mismos. El flexómetro consta de una resistencia en forma de tira, la cual varía su valor conforme se va flexionando. A mayor flexión, se produce mayor resistencia en sus terminales, valor que puede ser interpretado en un microcontrolador para determinar la posición de los dedos. Además, se usó un sensor de fuerza resistivo (FSR) que presenta una disminución de la resistencia cuando aumenta la fuerza aplicada a la superficie activa. Su sensibilidad a la fuerza está optimizada para uso en el control por toque humano de dispositivos electrónicos.

Por otro lado, para manipular las señales de control que actúan sobre el circuito de conmutación, se diseñó una interfaz en la plataforma Visual Studio, mostrada en la figura 22.

El movimiento de cada uno de los motores se controla de manera individual, además de que es posible determinar la dirección de movimiento. Cada uno de los dedos se puede controlar o manipular por medio de los botones y el *scroll*. En la parte inferior se encuentra el control de velocidad. En la Figura 15 se muestra el sistema completo propuesto en este trabajo.

Con el sistema implementado fue posible manipular cada una de las falanges de la mano utilizando la interfaz gráfica, para el movimiento de la mano se propone una alternativa, en donde a través de un guante de tela con un sensor de flexión adaptado, se lee movimiento de uno de los dedos, y a través de la adquisición de datos con el microcontrolador, la mano recrea el movimiento. El problema con este sensor de flexión es principalmente el tamaño, pues resulta difícil adaptar un sensor independiente para cada una de las falanges, como continuación de este trabajo se adaptará el flexómetro al resto de las articulaciones. En la figura 23 se muestra una fotografía de las pruebas realizadas durante la evaluación del sistema, para el caso evaluado la paciente utiliza un guante que cuenta al que se le adecuaron una serie de flexómetros para monitorear el movimiento de la mano del

paciente, los movimientos realizados por el paciente se reproducían en el prototipo experimental de la mano articulada. En la figura 24 se muestra el sistema de interacción completo.

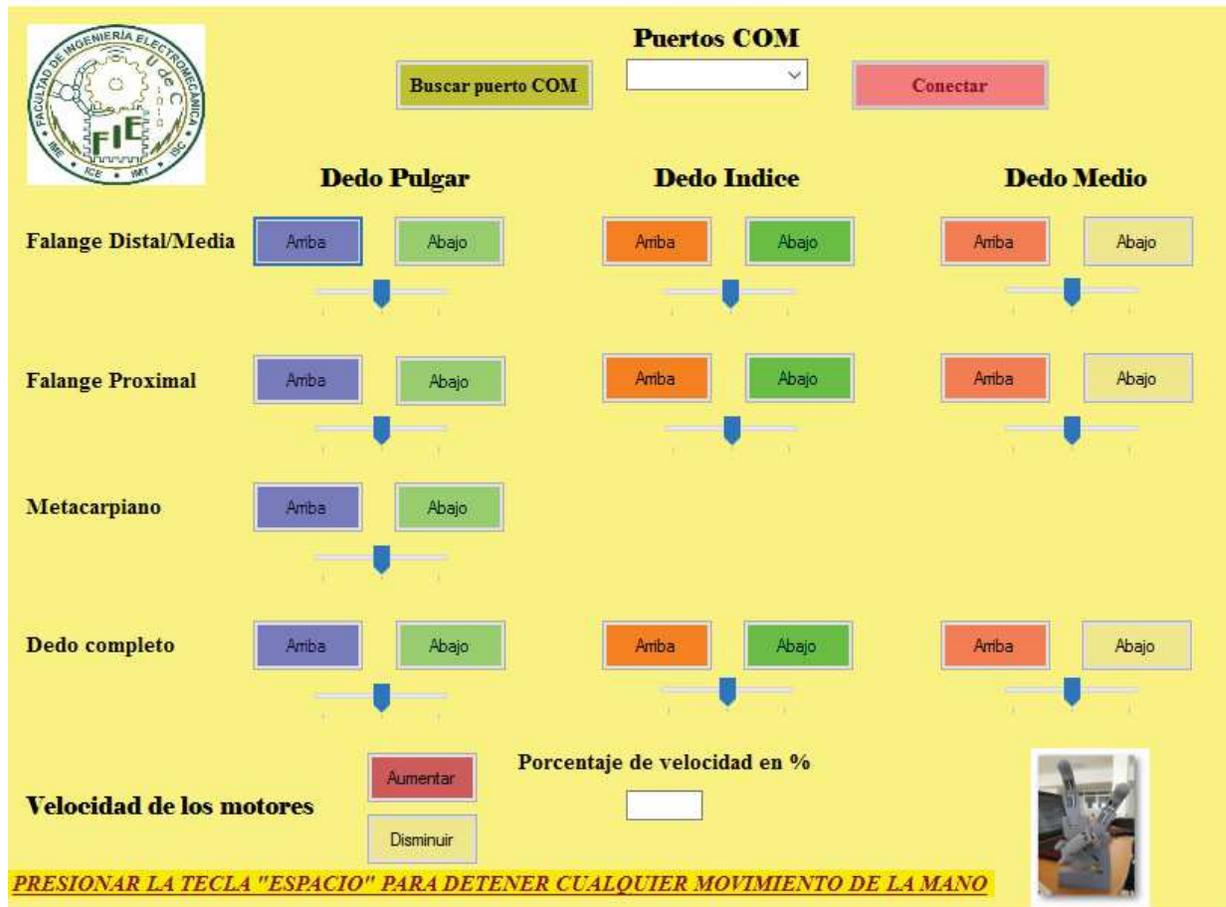


Figura 22. Plataforma de manipulación para el prototipo de la mano.



Figura 23. Pruebas preliminares con la mano articulada.

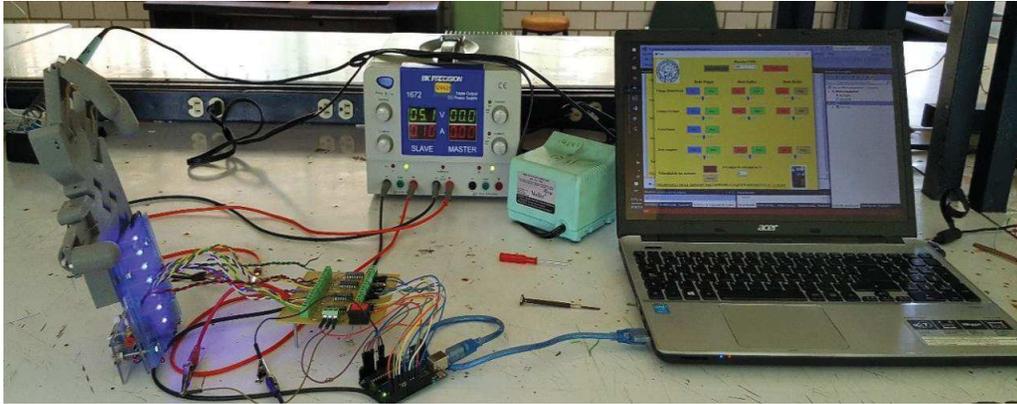


Figura 24. Sistema de manipulación y monitoreo para una mano en arquitectura abierta

## 4. Conclusiones

En este trabajo aborda el diseño y construcción de la primera versión de una mano robótica que consta de tres dedos articulados: medio, índice y pulgar. Como un primer prototipo se ha optado por estos dedos ya que con este tipo de estructura es posible generar los movimientos funcionales más utilizados en las tareas cotidianas como es el agarre de pinza, cilíndrico, esférico palmar, lateral y gancho. Además, se añade un grado de libertad al dedo pulgar para simular la función del metacarpiano. Para el diseño mecánico se utiliza el software SolidWorks® y se diseñan de manera individual las partes de los dedos pulgar, índice y medio, así como la de la palma y el metacarpiano del dedo pulgar. Como parte del sistema se diseñó y desarrollo una plataforma visual para medir y monitorear los movimientos de los dedos articulados. Con la primera versión del sistema propuesto fue posible manipular los movimientos de la mano través de la plataforma visual y del sistema auxiliar para interconexión a la plataforma.

## Referencias

- [1] Mason, M., & Salisbury, J. *“Robots hand and the mechanics of manipulation”*. MIT Press Cambridge, MA, USA, 1985.
- [2] Bennett D.J., Hollerbach J.M. *“Closed-loop kinematic calibration of the Utah-MIT hand”*. In: Hayward V., Khatib O. (eds) *Experimental Robotics I. Lecture Notes in Control and Information Sciences*, vol 139. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [3] Fukaya, N. (2000). *“TUAT/Karlsruhe humanoid hand”*. IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000), pp. 1-8, Japan, Oct. 30 - Nov. 5, 2000.
- [4] Tsuji, T., Shima, K., B, N., and Fukuda O. *“Biomimetic Impedance Control of an EMG Based Robotic Hand”*, *Robot Manipulators Trends and Development*, Agustin Jimenez and Basil M Al Hadithi (Ed.), InTech, pp. 213-23, 2000.
- [5] Zuñiga, T. y Andrade D. *“Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para personas sordomudas”*, *INGENIUS Revista de Ciencia y Tecnología*, vol 6, pp. 69-86., 2011.
- [6] Ocampo G., Rondón, J. *“Diseño y construcción de una mano robot de cuatro dedos que imite los modelos prensiles”*, Universidad Militar, Nueva Granada, 2004.
- [7] Rouviere, H. *“Anatomía humana descriptiva, topográfica y funcional”*, Elsevier, vol 2, pp. 309-311, 2005.



# Sistema de Monitoreo de un Estacionamiento Bajo el Concepto de Internet de las Cosas

Polo Lara José Alberto<sup>1\*</sup>, Ríos Rodríguez Marcelo<sup>1</sup>, Salazar Vázquez Rosa Guadalupe<sup>1</sup>, Méndez Alonso José Miguel<sup>2</sup>, Ramiro Ramiro José<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Alumno Investigador de Ingeniería Informática, Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla  
<sup>2</sup>Profesor Investigador de Ingeniería Informática, Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla  
<sup>3</sup>Profesor Investigador de Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla

## Resumen

*El desarrollo de las tecnologías informáticas y emergentes hoy en día se ha incrementado velozmente en el bienestar de las personas; primordialmente en la generación de aplicaciones informáticas vinculadas con sistemas electrónicos a fin de proporcionar información asertiva y verídica de actividades en tiempo real con respecto a algún proceso de interés, tales como: monitoreo de circuitos cerrados, reservaciones, entre otros. Es, por ende, que en el presente trabajo se da a conocer el desarrollo metodológico de un sistema integral basado en diseño web adaptativo que permita realizar búsquedas de espacios disponibles en tiempo real dentro de un estacionamiento, con la finalidad de aminorar el tiempo de búsqueda en localizar un sitio disponible. Para el desarrollo del trabajo expuesto se consideró el uso de entornos Web, Sistemas Gestores de Bases de Datos, sistemas electrónicos y de Red para la obtención, transporte, almacenamiento y tratamiento de información. De igual manera, es sustancial señalar que el desarrollo del presente trabajo prevé obtener un impacto de mejora ambiental y social.*

**Palabras clave:** Internet de las cosas, Diseño Web Adaptativo, Base de Datos, Arduino, Sensor.

## 1. Introducción

Hoy en día, la automatización de procesos bajo el concepto de Internet de las Cosas ha efectuado un cambio notable en el ciclo de las actividades diarias realizadas por el ser humano, tales como: manipulación de dispositivos de manera remota, obtención de información a distancia, monitoreo de comportamiento y cambios de estados en mecanismos de engranaje en tiempo real.

Las aplicaciones en tiempo real son un sistema informático que interactúa con su entorno físico y responde a los estímulos del entorno dentro de un plazo de tiempo determinado, asegurando el orden de aparición temporal de los flujos de información [1]. Actualmente las aplicaciones en tiempo real integran diversas disciplinas tales como: electrónica, mecánica e informática. Donde la electrónica y mecánica son empleadas en el armado del mecanismo o dispositivo; mientras que la informática se emplea para manipular y comunicar el flujo de información hacia un centro de datos empleando Diseño Web Adaptativo (DWA).

El DWA, es una filosofía con nuevo enfoque para solucionar los problemas de adaptabilidad considerando como parámetros el tamaño de pantalla, el tipo de dispositivo o la orientación; teniendo la capacidad de adaptarse a cada dispositivo, creando una solución de despliegue visual única para una gran variedad de dispositivos [2]. Este enfoque se centra primordialmente en el cliente, en su experiencia de usuario, y en permitirle trabajar en equipos de diferente resolución (equipo de



sobremesa, Tablet o Smartphone). Es, por ende, que en el presente trabajo se expone el desarrollo de una aplicación de Diseño Web Adaptativo para monitoreo y reservación de espacios en tiempo real de lugares disponibles en un estacionamiento combinando la electrónica, mecánica e informática bajo el concepto de Internet de las Cosas.

La Internet de la Cosas (IoT) es una extensión de la actual Internet que posibilita las conexiones y comunicaciones entre objetos y dispositivos físicos; considerando la forma en que se intercambian los datos, reuniendo todos los recursos e interacciones que involucran a los dispositivos, los datos y las personas en la Web [3].

## 2. Metodología de solución

El desarrollo del presente trabajo se consolidó en cuatro fases que permitieron obtener un sistema integral que permita la reservación y visualización de espacios disponibles en estacionamientos, el cual se representan en el diagrama siguiente

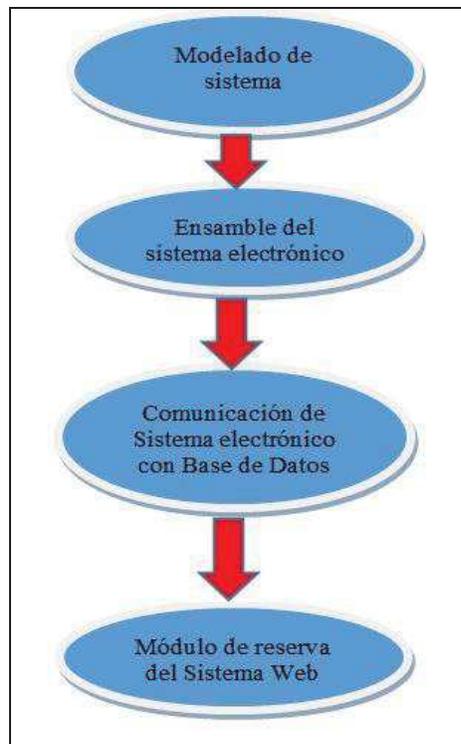


Figura 1. Diagrama de fases efectuadas para creación de sistema.

### 2.1 Modelado del sistema

El desarrollo del proyecto inicia con la fase de modelado de sistema y la creación de la base de datos, donde la comunicación entre ambos se realizó a través de una intranet. El modelado de sistema se efectuó utilizando el principio Entidad- Relación (E-R) empleando MySQL como sistema gestor de base de datos (SGBD) para almacenar información concerniente al estado de los espacios disponibles para que los usuarios efectúen el proceso de reservación.

Es sustancial mencionar que la creación de las entidades definidas en el SGBD se realizó mediante el proceso de normalización hasta la tercera forma normal (3FN), tal como se ilustra en la figura 2.

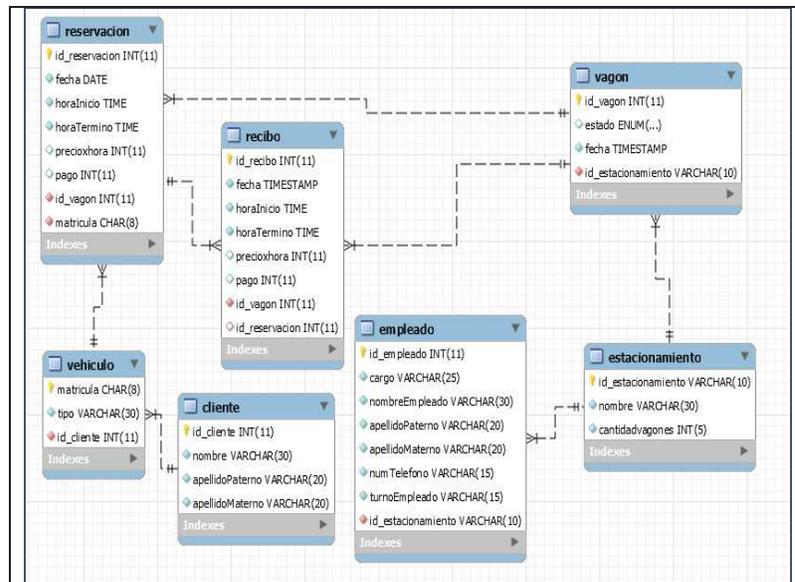


Figura 2. Modelo Entidad-Relación de la Base de Datos de Sistema de Estacionamiento.

Así mismo, para la representación del modelado se empleó lenguaje UML. El Lenguaje UML se entiende de la siguiente manera: “creado para forjar un lenguaje de modelado visual común y semántica y sintácticamente rico para la arquitectura, el diseño y la implementación de sistemas de software complejos, tanto en estructura como en comportamiento. UML tiene aplicaciones más allá del desarrollo de software, p. ej., en el flujo de procesos en la fabricación.” [6]

A través del lenguaje gráfico UML, se efectuó la representación visual del modelo a fin de visualizar, especificar y documentar los métodos y funciones que contiene el sistema; así mismo a través del modelo se identificó, como se encontraban vinculados elementos tanto electrónicos como informáticos. Para el desarrollo del modelo antes mencionado, inicialmente se realizó el diagrama de clases. Este instrumento, nos muestra de forma gráfica y por medio de una descripción, la estructura estática de un sistema. Donde se agrupan en categorías o grupos que contienen atributos o acciones similares, tal como se ilustra en la figura 3.

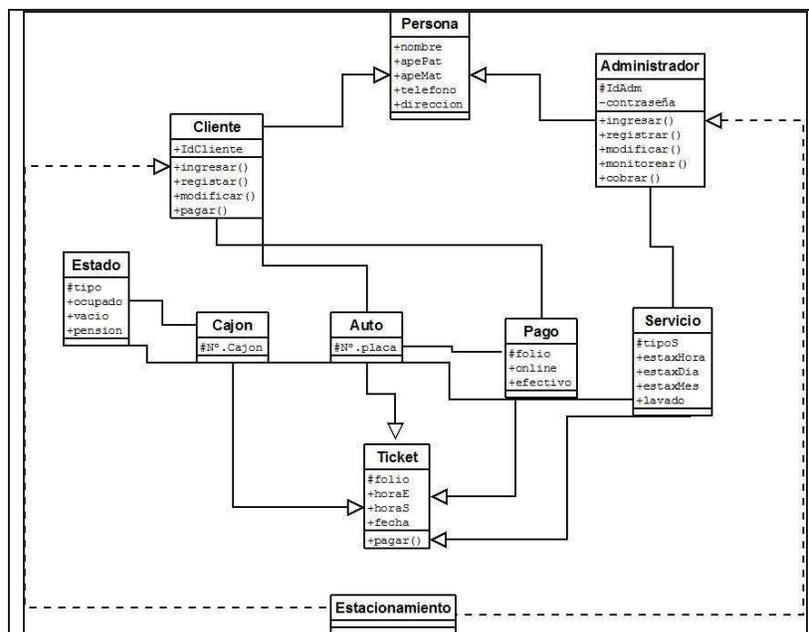


Figura 3. Clase y atributos del sistema.



Por otra parte, se hace una vinculación del diagrama de clases con el diagrama de objetos, donde un objeto es una instancia de una clase, por lo cual el diagrama de objetos se nota como una instancia de un diagrama de clases. Esta segunda forma de estructurar información describe la estructura estática del sistema y se hace uso de ellos para corroborar la precisión de los diagramas de clases. Contiene un objeto donde se coloca el nombre del objeto y con atributos listados en una parte inferior (Ver figura 4).

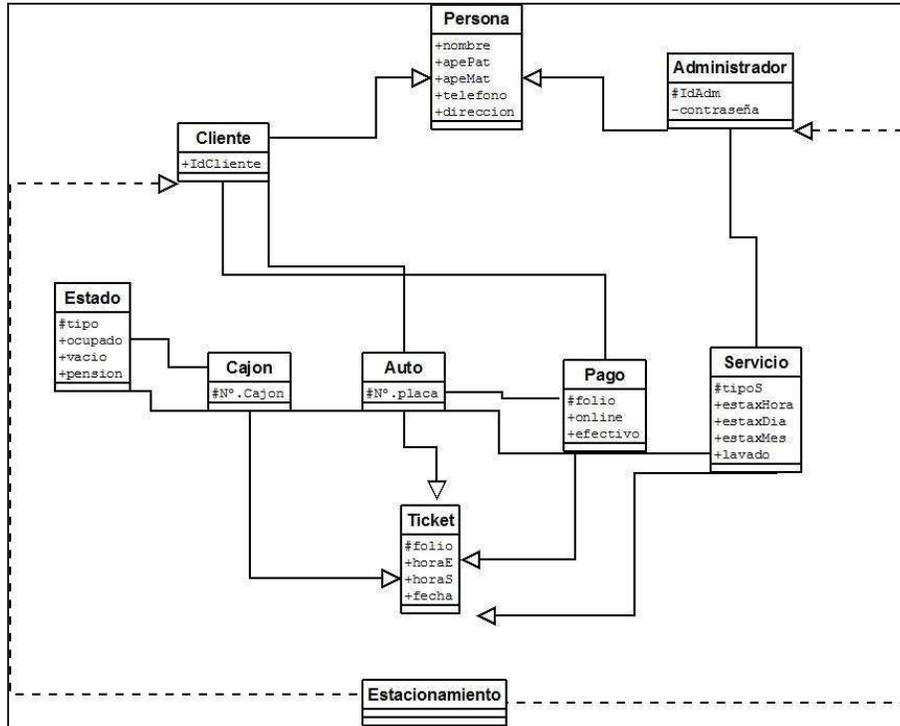


Figura 4. Clase y atributos del sistema (Vínculo entre diagrama de clases).

De igual manera, para entender y simplificar la interacción que existe entre el sistema y el usuario se empleó la realización de casos de uso. Un caso de uso representa: “...Una unidad funcional coherente de un sistema, subsistema o clase. En un caso de uso uno o más actores interaccionan con el sistema que realiza algunas acciones”. [8]

A través de los casos de uso se logró describir las acciones del sistema desde el punto de vista del usuario, al igual que las del administrador del sistema. Es importante señalar que esta técnica loable permitió identificar la interacción y comportamiento del usuario con el sistema. En el primer caso de la figura 5, el cliente se encuentra realizando diversas acciones, tales como el ingreso al sistema, realizar reservación, realizar el pago y último a esto se genera el recibo correspondiente al generar la reservación. En el caso de uso número 2, se observa que el usuario llamado Administrador del sistema, de igual forma realiza varias actividades como manipular y observar la información que generan las reservaciones de los usuarios externos.

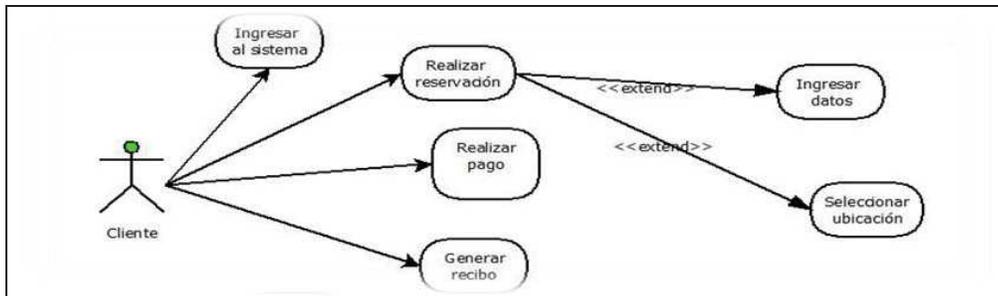


Figura 5. Caso de uso de Cliente.

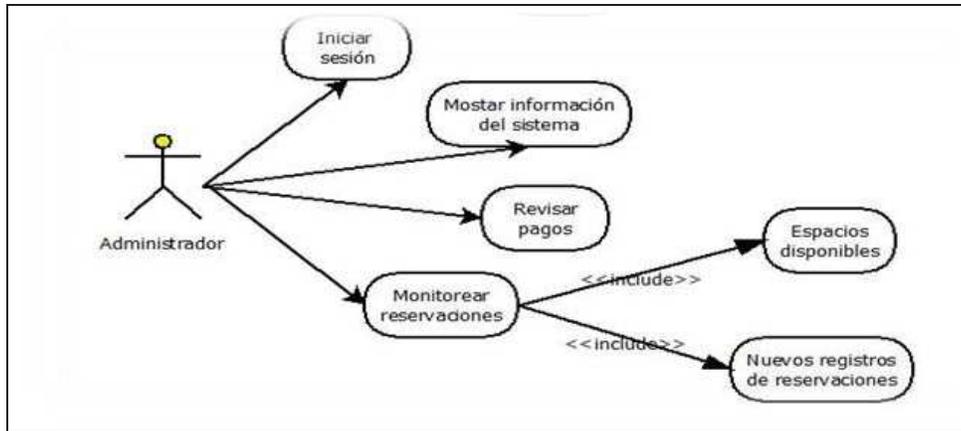


Figura 6. Caso de uso de Administrador.

Una vez concluido lo anterior, se procedió a efectuar un diagrama de secuencias. Un diagrama de secuencias es: *“una forma de diagrama de interacción que muestra los objetos como líneas de vida a lo largo de la página y con sus interacciones en el tiempo representadas como mensajes dibujados a través de flechas desde la línea de vida origen hasta la línea de vida destino. Los diagramas de secuencia son buenos para mostrar qué objetos se comunican con qué otros objetos y qué mensajes disparan esas comunicaciones. Los diagramas de secuencia no están pensados para mostrar lógicas de procedimientos complejos.”* [7].

Mediante el diagrama de secuencias se pudo observar cuales son los roles que desempeñan los actores (en este caso los usuarios que visualiza los espacios), cuando actúan y el tiempo que representa realizar dichas acciones en coordinación con medios externos.

El proceso secuencial del proyecto inicia con el ingreso al sistema por parte del cliente o usuario, a fin de que visualice que espacios existen disponibles e identifique cual desea reservar. Aunado a ello, se debe elegir el sistema de pago, para posteriormente generar un ticket como comprobante de pago. Es sustancial señalar que en la expedición del ticket se muestran diversos tipos de datos, tales como: hora de ingreso, hora salida, número de espacio, monto total y fecha. Tal como se ejemplifica el proceso en la figura 7.

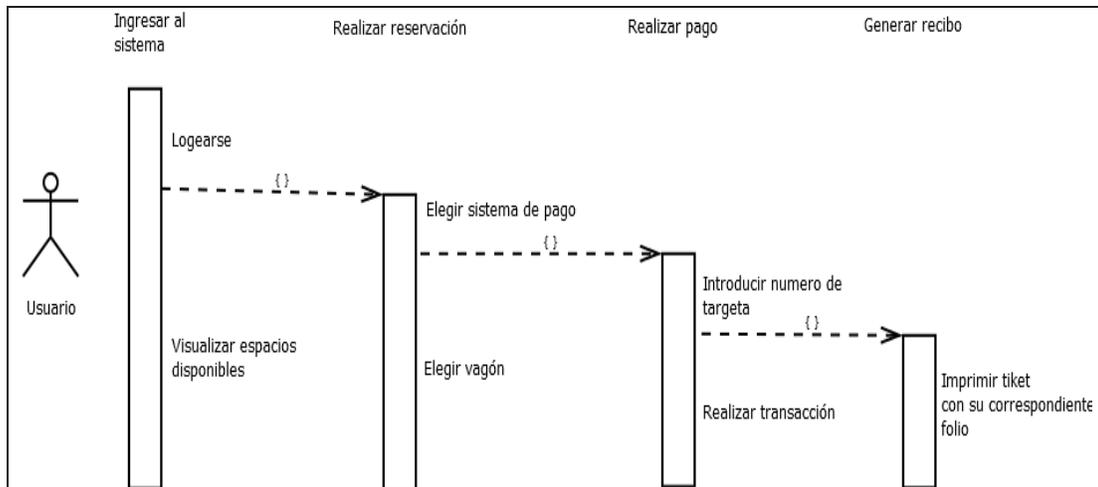


Figura 7. Diagrama de secuencias (Usuario).

Una vez realizado el diagrama de secuencias, se procedió a efectuar el diagrama de componentes. El diagrama de componentes es: *“muestra los elementos de un diseño de un sistema de software. Un diagrama de componentes permite visualizar la estructura de alto nivel del sistema y*



el comportamiento del servicio que estos componentes proporcionan y usan a través de interfaces. Para crear un diagrama de componentes UML, en el menú Arquitectura, haga clic en Nuevo diagrama UML o de capas.” [9]

El uso de diagrama de componentes se realizó con la finalidad de indicar el funcionamiento y recopilación de datos de los componentes electrónicos (placa Arduino, sensores ultrasónicos) y el sistema web adaptativo.

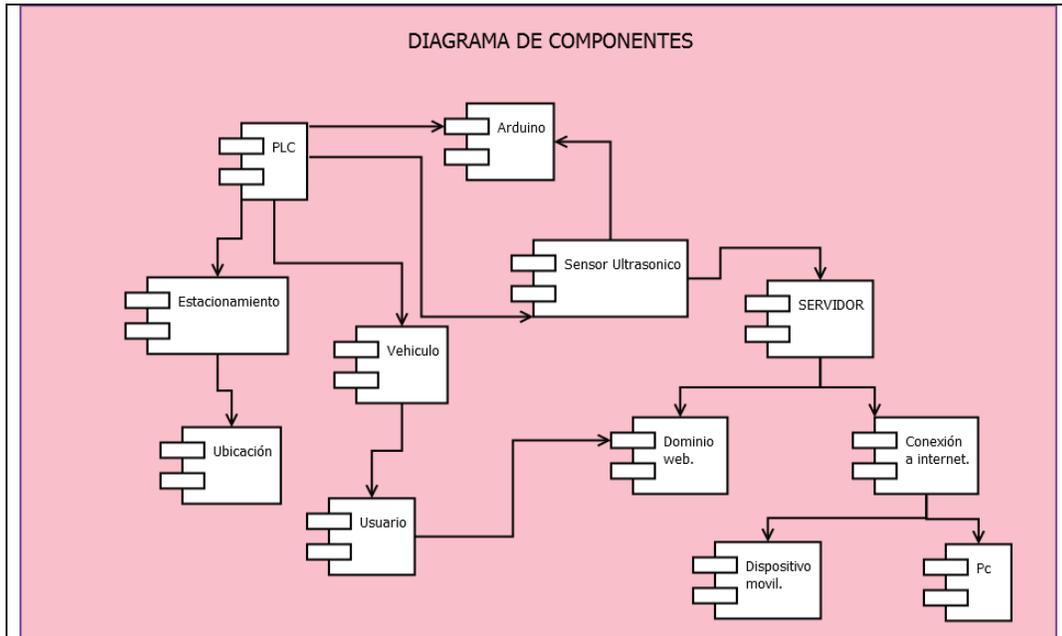


Figura 8. Componentes electrónicos y del sistema de información

## 2.2 Ensamble del sistema electrónico

Para desarrollar esta fase, se consideró el uso de los siguientes materiales: Arduino UNO, Arduino Ethernet, cable de red, sensor ultrasónico, botones, Jumpers, resistencias y un Protoboard. Mismos que tiene la función de recoger los datos que emiten los sensores ante la presencia de un vehículo, o la ausencia de éste.

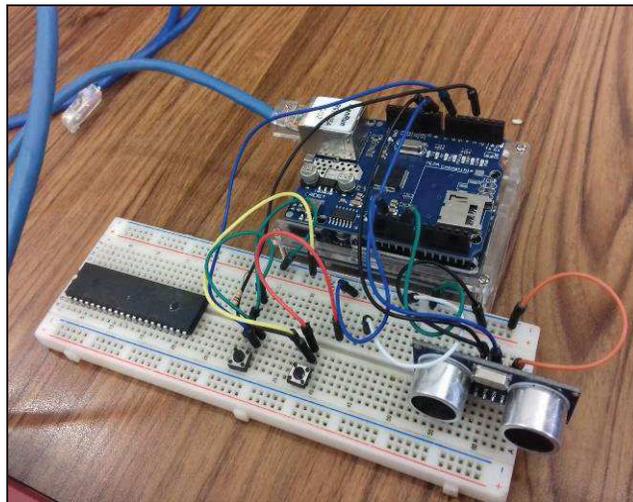


Figura 9. Ensamble y conexión en la primera fase del prototipo electrónico.

### 2.3 Comunicación del sistema electrónico con la base de datos

En esta etapa, se realizó la comunicación del sistema electrónico a través de una red LAN empleando una Arquitectura Cliente-Servidor. Implementando del lado del cliente el sistema web basado para un sistema electrónico; mientras que del lado del servidor se implementó un servidor Web (Apache), mediante el cual, haciendo uso de PHP, se realizó la inserción de registros a la Base de Datos. Cabe destacar que las inserciones de los datos fueron realizadas en función al estado de los sensores, mismos que presentan una característica peculiar donde presentan dos estados: disponible u ocupado.

	id_vagon	estado	fecha
<input type="checkbox"/>	14	Reservado	2017-03-27 13:3
<input type="checkbox"/>	15	Reservado	2017-05-22 08:4
<input type="checkbox"/>	16	Reservado	2017-05-22 12:3
<input type="checkbox"/>	17	Reservado	2017-05-22 12:4
<input type="checkbox"/>	18	Reservado	2017-05-24 10:7
<input type="checkbox"/>	19	Reservado	2017-05-24 11:0
<input type="checkbox"/>	20	Disponible	2017-05-24 12:7
<input type="checkbox"/>	21	Reservado	2017-05-24 12:3
<input type="checkbox"/>	22	Ocupado	2017-05-24 12:3
<input type="checkbox"/>	23	Reservado	2017-05-24 12:3
<input type="checkbox"/>	24	Disponible	2017-05-24 12:3
<input type="checkbox"/>	25	Reservado	2017-05-24 13:0
<input type="checkbox"/>	26	Reservado	2017-05-24 13:7
<input type="checkbox"/>	27	Reservado	2017-05-24 13:7
<input type="checkbox"/>	28	Ocupado	2017-06-01 15:3
<input type="checkbox"/>	29	Ocupado	2017-06-01 15:3
<input type="checkbox"/>	30	Disponible	2017-06-01 15:3
<input type="checkbox"/>	31	Disponible	2017-06-01 15:3
<input type="checkbox"/>	32	Disponible	2017-06-01 15:3
<input type="checkbox"/>	33	Disponible	2017-06-01 15:3
<input type="checkbox"/>	34	Disponible	2017-06-01 15:3

Figura 10. Obtención de información del sistema electrónico.

De igual manera en esta fase, se procedió a programar el sistema electrónico con el lenguaje de programación Arduino empleando el protocolo de comunicación TCP-IP, definiendo una IP estática y una puerta de enlace del mismo rango de la red LAN para que existiera comunicación entre el servidor y el cliente; con la finalidad de que, el usuario que busque un lugar disponible en un estacionamiento mediante el uso de la aplicación web. Donde, en el sistema gestor de base de datos se verá reflejado el cambio de estado de lugares ocupados o disponibles, tal como se ilustra en la figura 10.

### 2.4 Implementación del módulo de reserva del sistema web

Para la visualización y tratamiento de información contenida en la Base de Datos, se ha considerado el desarrollo de un sistema Web bajo el Concepto de DWA, a fin de desplegar la aplicación en resoluciones de pantalla desde 720 x 1280p hasta 4096 x 2160p, para proporcionar una mejor calidad de despliegue visual al usuario, tal como se ilustra en la figura 11-12.



Figura 11. Página de inicio del Sistema Web visualizado en una PC con resolución de 1366 x 768p.

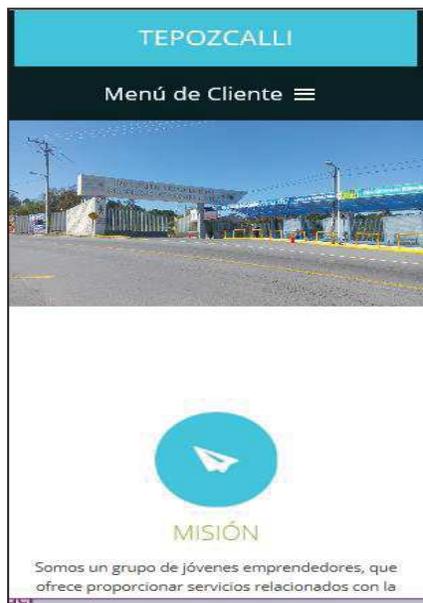


Figura 12. Página de inicio del Sistema Web visualizado en dispositivo móvil de 380 x 650p.

El despliegue visual que se le proporciona al usuario es a fin de permitir visualizar los espacios disponibles Online empleando una conexión a internet, donde para ello el sistema ofrece diversas características, tales como: realizar pagos, imprimir comprobante de pago y realizar una reservación. (Ver figura 13).

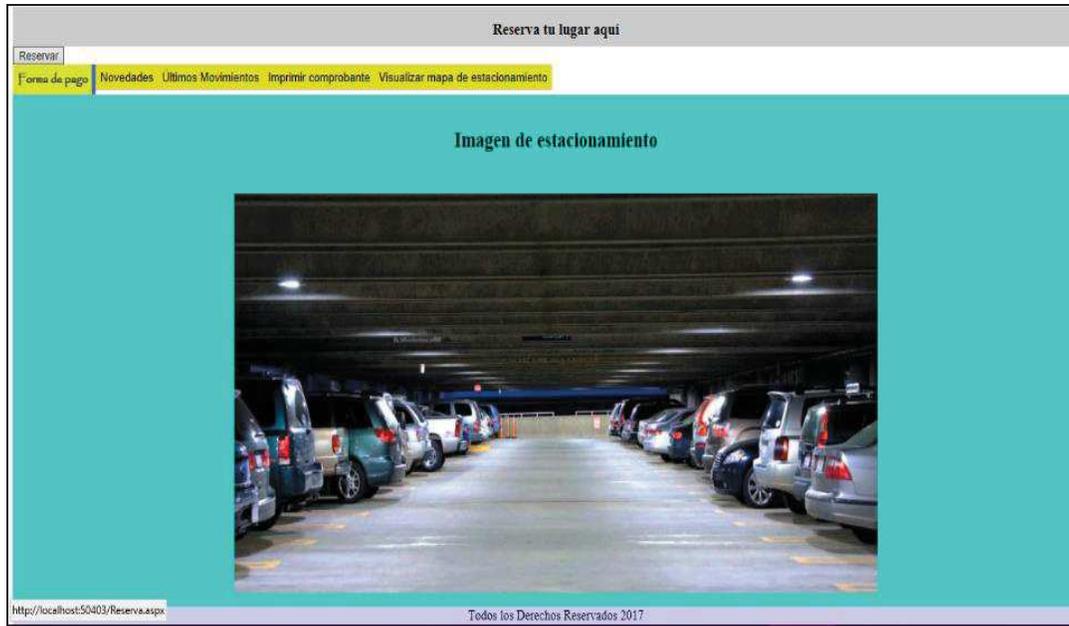


Fig. 13. Desarrollo del módulo de Reservación del Sistema Web.

### 3.- Resultados

Se presentó el desarrollo de un sistema web de diseño adaptativo bajo el Concepto de Internet de las cosas, el cual incluye un prototipo electrónico, para enviar información hacia la Base de Datos y un sistema de información con el cual se puede visualizar información con respecto a que espacios se encuentran disponibles u ocupados dentro de un estacionamiento.

Actualmente, las funcionalidades del sistema que se tienen implementados son las siguientes:

- Armado del primer prototipo de conectividad hacia Base de Datos para el envío de información de sensores.
- Obtención de información de los sensores colocados en cada espacio del estacionamiento para indicar si está ocupado o disponible.
- Visualización del sistema Web responsivo, en resoluciones de pantalla desde 380 x 650p hasta 4096 x 2160p en computadoras personales y para los dispositivos móviles.
- Se implementó el módulo de reserva, para realizar reservaciones vía online de un espacio disponible en el estacionamiento.
- Se implementó un sistema de reserva/pago en línea/ factura
- Es un sistema integral el cual permite resolver un problema ambiental y social en cuanto a la búsqueda de lugares de estacionamientos en zonas urbanas.
- Se buscó como opción utilizar el mínimo de recursos en cuanto al consumo de datos móviles para ofrecer un mejor servicio.

### 4.- Conclusiones

Durante las pruebas realizadas en diversos dispositivos, se pudo apreciar que el sistema web adaptativo se acoto a las diferentes resoluciones de manera satisfactoria. De igual manera se puede concluir que para realizar la comunicación del sistema electrónico con la base de datos fue necesario emplear protocolos de seguridad y métodos de encriptación para salvaguardar la integridad de la información al emitir una reservación.

Como trabajo futuro se pretende integrar un algoritmo de inteligencia artificial para la asignación de lugares disponibles para personas con alguna discapacidad física; a fin de asignarlo a la puerta o salida más cercana del estacionamiento.



En cuanto al sistema electrónico se efectuará el uso de un controlador de tipo industrial (PLC'S), al igual que sensores de la misma gama que estos sistemas son de uso continuo al igual de soportar trabajo extremo y tiempos prolongados, con lo cual se obtendrá un monitoreo en tiempo real de espacios disponibles dentro de estacionamientos, en consecuencia, se obtendrá veracidad en la información presentada para los clientes de estacionamientos. Además, se equipará un sistema de seguridad, que consiste en barras de acero para asegurar el vehículo y cuidarlo de algún percance. Se le habilitará una fuente de energía emergente externa en caso de que ocurra un apagón general.

Por otro lado, se efectuará la consolidación de un plan de negocios sólido, en donde se plasmará conceptos como las generalidades de la organización y el análisis cuantitativo del mercado en donde se pretende estudiar el mercado potencial con herramientas como: análisis FODA, recabar características del mercado, identificación de la competencia, los canales de distribución, Estudio Técnico-Ambiental en donde se tocan temas sobre Localización del negocio, Disponibilidad de materias primas, Definición de la tecnología a aplicar, Distribución de la planta, Diagrama de proceso por producto o servicio, La normatividad aplicable al impacto ambiental, Determinación de los gastos indirectos de fabricación, Punto de equilibrio, Margen de contribución por producto/servicio, Grado de apalancamiento operativo, Impacto socioeconómico del negocio.

También se pretende obtener la patente de esta investigación, que al final de cuentas esta incrustado en el plan de negocios, en donde se pretende llevar a cabo la Gestión administrativa, legal y fiscal, llevando a cabo el Diseño organizacional del negocio, Descripción de las funciones específicas de cada área básica, Identificación de los empleos directos e indirectos a crearse, Definición de la estructura legal del proyecto, Régimen fiscal al que pertenecerá del proyecto, Dependencias u organismos competentes para registrar la apertura de una empresa y Registro de marcas y patentes.

## Referencias

- [1] Thomas D. C. Little, Arif Ghafoor. "Synchronization and Storage Models for Multimedia Objects". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume 8, Number 3. April 1990, pp. 413-427.
- [2] Marcotte Ethan. (2010) *Responsive Web Designe* (1ra Edición). New York. A Book Apart.
- [3] Gustafson Steven, Sheth Amit, *La Web de las Cosas*. Marzo del 2014, disponible en: <https://www.computer.org/portal/web/computingnow/archive/march2014-spanish>.
- [4] Gauchat J. *El gran libro de HTML 5, CSS3 y JavaScript* (1ra Edición en electrónico). 2012. Barcelona, España. Marcombo.
- [5] Universidad de los Andes (2011), *Casos de Uso: Diagrama de casos de uso*. Venezuela:.
- [6] Inc, L. S. (2017). Lucidchart. *Lenguaje Unificado de Modelado* Recuperado el 13 de Septiembre de 2017, de Lucidchart: <https://www.lucidchart.com/pages/es/qué-es-el-lenguaje-unificado-de-modelado-uml>.
- [7] Sparx Systems. (2000). *Diagrama de Secuencia UML 2*. Sparx Systems. Recuperado el 12 de Septiembre de 2017, de: [http://www.sparxsystems.com.ar/resources/tutorial/uml2\\_sequencediagram.html](http://www.sparxsystems.com.ar/resources/tutorial/uml2_sequencediagram.html)
- [8] Vega, M. (Octubre de 2010). *Casos de Uso UML*. Granada, Andalucía, España.
- [9] Microsoft. (2017). Developer Network. *Diagramas de componentes de UML: Referencia* Recuperado el 12 de septiembre de 2017, de Microsoft Developer Network: <https://msdn.microsoft.com/es-es/library/dd409390.aspx>



# Implementación de un sistema biométrico para el encendido de vehículos por medio de la huella dactilar.

Arvizu Ramírez Antonio<sup>1</sup>, Chavero Reséndiz José María<sup>1</sup>, Rodríguez Hernández Vicente<sup>2</sup>, Suárez Enríquez José de Jesús<sup>1</sup>, Vélez Castañeda Andrew<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ingeniería en Telemática, Ciencias, Artes y Metaeducación San José, SEG

<sup>2</sup> Facultad de Informática, UAQ

## Resumen

*En el presente artículo se describe el proceso mediante el cual se implementó un sistema biométrico con reconocimiento de huella dactilar con el cual se controló el encendido de un vehículo sustituyendo el sistema de encendido convencional de cerradura, por medio de la adaptación de un dispositivo lector de huella dactilar. Dicho sistema tiene por objetivo innovar el mercado proponiendo un nuevo método de encendido automático que contribuye tecnológicamente a la seguridad en el sector automotriz, y permitiendo al usuario almacenar distintas huellas de quienes considere convenientes. Implementar este sistema exige investigar y comprender la configuración eléctrica de los sistemas de encendido con switch, la electrónica de un sistema inmovilizador, y el funcionamiento de los sistemas de alarma existentes en el mercado. Fue desarrollado un circuito de acoplamiento que favoreció el desarrollo y atenuó el proceso de instalación.*

**Palabras clave:** Sistema Biométrico, Automóvil, Enrolamiento, Huella dactilar, Encendido automotriz, Autentificador.

## 1. Introducción

¿Por qué debería ser interesante esta propuesta? La tecnología avanza día con día y a un ritmo impresionante, año tras año se presentan nuevos avances en casi todas las áreas, en el sector automotriz, se han implementado todo tipo de computadores que controlan principalmente el motor, dependiendo de la gama del vehículo, también los diversos sistemas de a bordo. Avances que lo mismo se aprecian en un avión, o incluso un barco. Son los automóviles así como los teléfonos inteligentes los ejemplos más claros y los elementos más accesibles en la sociedad.

La importancia de esta propuesta radica en los avances tecnológicos que se han presentado en los últimos años, y que parecen no tener un límite. A medida que tomamos esta tecnología en nuestras manos y nos convertimos en usuarios, se crea al mismo tiempo la necesidad de poseer un grado de privacidad, y uno de los principales aspectos es la seguridad. Esto termina creando un sin número de contraseñas para acceder a nuestra información, equipos inteligentes o bienes, en este sentido la biometría es la solución [1]. La biometría en su definición simple es el estudio automático para poder reconocer los rasgos humanos. La palabra biometría se traduce como “medida de la vida” [2]. Como medio de identificación es un sistema muy eficiente que requiere de tres sencillos pasos;

1. Enrollment o Enrolamiento: Consiste en la captura de la huella dactilar de un individuo, tomando una imagen.
2. Storage o Almacenamiento: Se trata del atesoramiento de la imagen anterior con un nombre o número de identificación.
3. Comparison o Comparación: Cuando de manera consecutiva se introduzca una imagen de huella dactilar en el sistema, será comparada con la(s) imagen(es) almacenada(s).

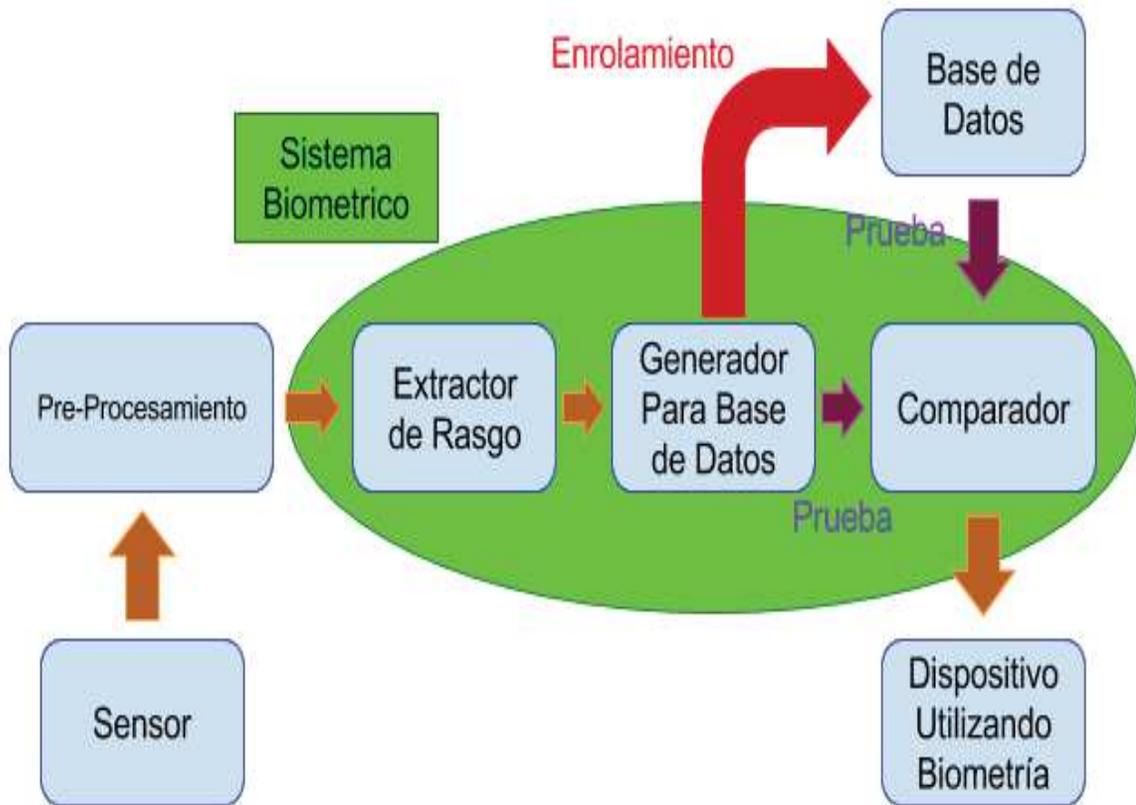


Figura 1. Block Diagram. Diagrama que describe la metodología de la biometría.

Los mismos autores de este trabajo [3] le llaman “Esquemas de Autenticación” a la manera de reconocerte sin conocerte. De esta manera dividen en dos partes dichos “esquemas”. La primera sería la tradicional (una clave bancaria, las llaves de un automóvil, la contraseña de una cuenta en internet o una tarjeta id), son la forma que se utilizaba para poder reconocerte. Con la tecnología biométrica y el avance tecnológico los esquemas de autenticación cambian.

Para ir más a fondo, el autor Lawrence O ‘Gorman logra dividir en tres la manera de reconocer, o “Authenticator” como lo llama en su obra [4]. Un “Authenticator” es una manera de identificar, y podría ser traducido como autenticador. La contraseña ha sido la manera de identificar por décadas, pero en la actualidad, resalta la necesidad de tener que recordar contraseñas más largas, que si bien el método ha funcionado, la cuestión es tomarse más tiempo y posiblemente más esfuerzo para aprenderse y en pasos siguientes recordar ésta contraseña. Pero en su obra [8], hace hincapié en la inseguridad de los autenticadores y menciona tres clases de ellos, los cuales son considerados como la mejor manera de dividirlos:

1. Basado en Sabiduría (“lo que se sabe”) – Esto es caracterizado por el secreto o la oscuridad. En esta categoría figuran las contraseñas memorizadas. El autor también hace mención a que pueden ser oscuras, más no secretas. Ejemplo es el nombre de la mascota de la familia o nombre de ambos abuelos. Para la familia no son secretos mas no cualquiera lo conoce o no saben que son contraseñas, lo cual los hace oscuras. El mayor problema con este tipo de seguridad o autenticador es que al momento que se comparte, se vuelve menos secreto.



2. Basado en Objeto (“lo que se tiene”) – Estos autenticadores son basados en objetos físicos. Llaves físicas son el ejemplo más común – llamados llaves metálicas para diferenciarlas de otro significado con la palabra llaves – son autenticadores que han soportado la prueba del tiempo. El defecto mayor de este tipo de autenticadores es que se pueden perder, permitiendo al individuo que encuentre estas llaves el entrar a lo que abren las mismas, Una casa, un vehículo, etc. Hoy en día muchas de estas incluyen una protección adicional en caso de ser extraviada. Una ventaja única de este tipo de autenticador es que si llegan a ser extraviadas, el dueño puede percibir esto y actuar de inmediato.

3. Basado en Identificación (“quien se es”) – Finalmente, este autenticador es basado en quien se es. Su característica predominante es el hecho de que es único. Una licencia para conducir, un pasaporte, una tarjeta de crédito, etc. Todos entran en esta categoría, la biometría igualmente pertenece a esta categoría. La huella, el iris, la voz, hasta la lengua tiene rasgos únicos y obtenibles. Para ambos, documentos de identificación y biometría, la seguridad es su rasgo más predominante ya que son difíciles de copiar o replicar, no son tan fáciles de reemplazar como lo es las contraseñas o un objeto físico.

La justificación de elegir la huella dactilar como rasgo biométrico de identificación se basa en la consulta de los 7 puntos claves mencionados en el trabajo por la autora Jain [5], los cuales se mencionan a continuación:

- Universalidad: Toda persona utilizando este medio debe poseer este rasgo.
- Único: El rasgo debe ser lo suficientemente diferente a otros rasgos de otros individuos de tal manera que puedan ser diferenciados.
- Permanencia: Esto se refiere directamente al tiempo. Algunos rasgos varían de acuerdo al tiempo, más específicamente, un buen rasgo permanecerá con el individuo sin importar el tiempo.
- Medible: El rasgo debe ser fácil de obtener pero sobre todo debe ser medible u obtenible. Adicionalmente, los datos adquiridos se deben presentar de manera que permitan ser procesados y extraer información de ellas.
- Rendimiento: Se refiere a la velocidad, acertamiento y en general eficiencia de la tecnología utilizada.
- Aceptabilidad: Este punto es interesante, ya que se refiere a la aceptación de los individuos para permitir que la tecnología registre su rasgo único.
- Desgaste: Se refiere a lo fácil que el rasgo puede desgastarse por uso.

El método biométrico correcto para utilizar varía y depende de acuerdo al caso. Algunos métodos pueden ser cuestión de conveniencia o seguridad como lo dice el autor Paul Bleicher [6].

Pero para la aplicación de un sistema biométrico sobre un sistema de encendido automotriz, no basta con la efectividad de uno de éstos, sino, además el correcto acoplamiento de ambos, la industria automotriz ha invertido tiempo y dinero en el desarrollo de sistemas electrónicos confiables, tanto para funcionamiento como diagnóstico de mantenimiento o programación, ésta última parte ha sido un punto de vulnerabilidad para los métodos de seguridad antirrobo incluso de última generación. La implementación de un sistema biométrico que controle el encendido del vehículo es un sistema que bajo una correcta instalación, en cuestión de funcionamiento ofrece la efectividad de cualquier sistema actual, sumada la ventaja de que solo el usuario autorizado tiene acceso y control, pero para efectos de poner en marcha un automóvil, queda en cuestión ésta ventaja, y es más práctico que por lo menos dos usuarios, o incluso más dependiendo del tipo de uso que se le brinde al automóvil, ejerzan el control como usuarios predeterminados por las situaciones bajo las cuales se pueda encontrar la necesidad de encender un automóvil.



## 2. Componentes

La biometría utiliza aplicación de las matemáticas y en ocasiones la estadística. Al igual, el sistema utiliza cuatro componentes básicos:

1. Un Sensor: Su trabajo es identificar las características que serán utilizadas.
2. Un Microcontrolador. Actuará como interfaz entre la computadora y el sistema que se pretenda implementar.
3. Una computadora: Adquiere, procesa, emite o almacena la información
4. Un software: Analiza la característica, lo traduce a código o gráfica y ejerce la comparación.

Debido a la falta de información histórica se procedió a realizar una evaluación de modelo que permita el análisis de la información [7], basándonos en Proteus 8, un software que permite la creación esquemas electrónicos. Esto nos permitió elaborar un ejemplo virtual del trabajo.

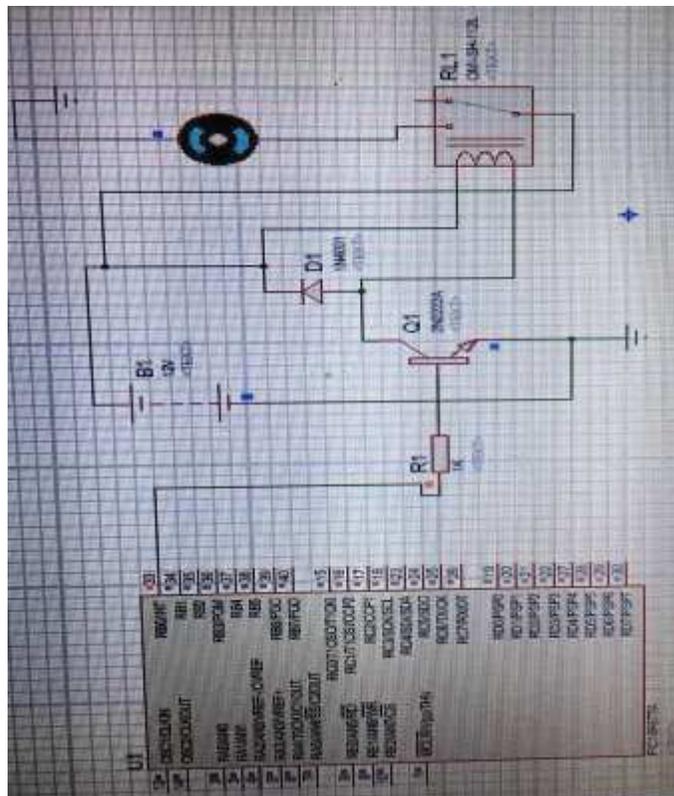


Figura 2. Esquema elaborado con Proteus 8.



La imagen en forma sencilla consiste de siete dispositivos que hacen espejo a dispositivos reales [8] que se utilizaron para llevar a cabo este proyecto. A continuación se darán a conocer en forma de lista:

- **U1** - Fue utilizado como un microcontrolador que por su portabilidad se decidió utilizar la plataforma arduino. Este dispositivo se puede interpretar como el cerebro. Fue la conexión directa con la computadora y al mismo tiempo con el dispositivo que envía los comandos al total de los elementos para ejercer su función.
- **R1** – Representa una resistencia. Su función es disminuir el flujo de electricidad para proteger los demás dispositivos de una sobre carga.
- **B1** – Figura como fuente de alimentación, la forma de obtener electricidad, que en el ejemplo real se refiere a la batería del automóvil. Su función principal es brindar voltaje a todos los dispositivos. Es posible que otros dispositivos se pueden omitir o reemplazar, pero este componente es una parte fundamental.
- **Q1** – Aparece como transistor. Un transistor cumple diversas funciones en el mundo de la electrónica, pero en este caso se utiliza en su función más popular, a manera de conmutador. Debido a su variedad, las especificaciones que deba cumplir el mismo dependerán del uso y el tipo de proyecto.
- **D1** - Fue utilizado como un diodo. Un diodo cumple la función de no permitir que la corriente fluya de manera contraria. Para proteger los dispositivos o contraflujos indeseados.
- **RL1** – Representa un relevador. Este relevador cumple la función de, igual que un transistor, conmutar la electricidad, pero mediante un sistema electromecánico. Un relevador funciona, explicado sencillamente, por medio de una bobina. Al momento que fluye un voltaje a través de la misma, genera un campo magnético, de igual forma, debido a su variedad, se deberán contemplar las especificaciones dependiendo el objetivo deseado.
- El último objeto en forma de círculo que se observa, fue utilizado como la simulación del motor de un vehículo.

Este simulador se ejecutó sin aparentes fallas. Cabe mencionar que muchos de los proyectos de este tipo se llevan a cabo en plataformas de simulación similares, sin realizar un montaje real, sin enfrentar los problemas, sin reconocer ni apreciar las diferencias de tener el sistema funcionando sobre un vehículo.



### 3. Montaje en Vehículo

Lo que se pretende con el modelo presentado, obliga considerar que, en el encendido de un automóvil se deben cumplir dos estados que necesita un vehículo de manera básica, la ignición y el arranque, es decir, girar el switch, que energiza el sistema del vehículo y el segundo estado es la puesta en marcha que enciende el vehículo, así que lo principal hasta este punto será conseguir estos dos estados a manera de simulación con un par de leds, encender y dejar encendido uno, mientras otro solo enciende unos cuantos segundos después del primero calculando el tiempo de encendido del vehículo. Conviene comenzar a realizar las primeras conexiones; dos salidas digitales en la placa arduino que se conectarán al protoboard, además de enviar alimentación de 5V junto con GRD. En ambas salidas una resistencia cuyo extremo desemboque en el ánodo de cada uno de los leds a utilizar, por consiguiente el cátodo de cada led tendrá que estar conectado a GRD en el protoboard. Los dos estados obtenidos representados en los leds, posteriormente serán utilizados como señales de activación a la bobina del relevador, éste paso es crucial porque será el puente desde los semiconductores que es donde hemos estado trabajando, hacia el sistema eléctrico del automóvil, así que es importante determinar las especificaciones que debe tener el relevador para contribuir con la correcta instalación.

Los vehículos hoy en día utilizan baterías de 12V, con motor en marcha alcanzan 14V como máximo. Activar la marcha de un auto es una tarea que consume la mayor cantidad de la energía, pero desde el punto de encendido que se pretende sustituir, que es el encendido de cerradura, se tiene un importante punto de partida ya que el esfuerzo eléctrico que recae en el cableado en esta parte disminuye posibles fatigas que comprometan el funcionamiento del vehículo. Al hacer un análisis del cableado, se aprecia una conexión directa con módulos de control que se encargan de realizar las tareas pesadas de soportar ignición y puesta en marcha, interpretando los voltajes del switch ya solo como señales de activación. A continuación se mostrará el diagrama básico de ignición de un vehículo moderno:

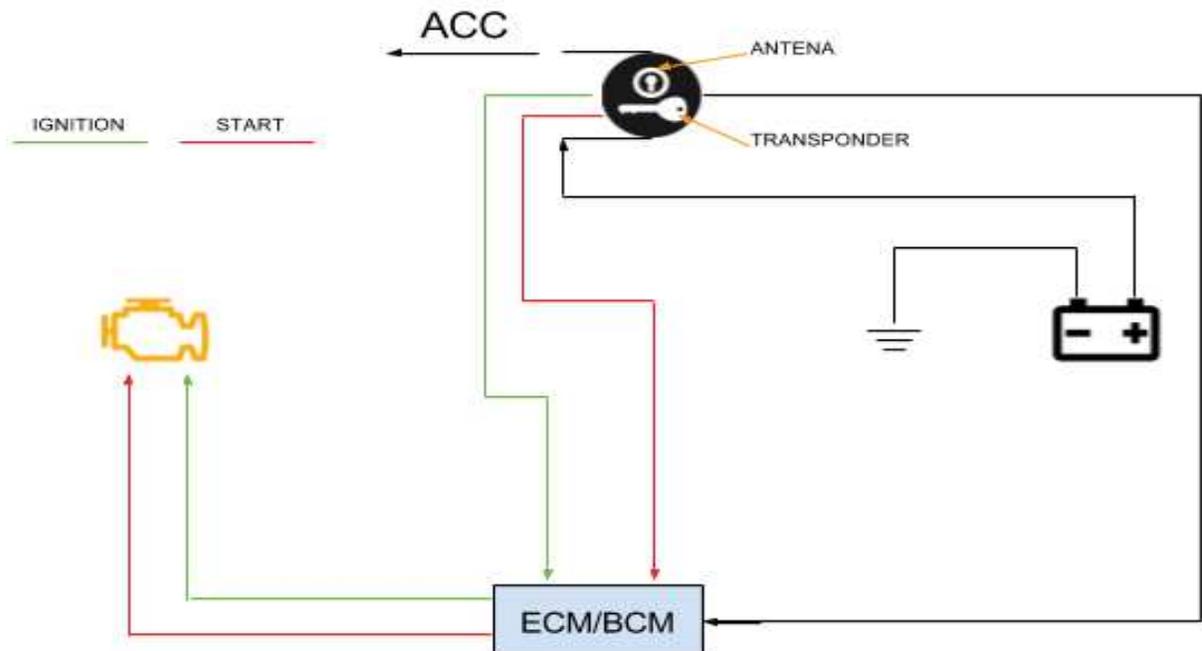


Figura 2. Diagrama Básico del Encendido de un vehículo Actual.



## 5. Resultados

Se implementó el esquema elaborado con Proteus 8. Teniendo los conceptos cómo se pretendía implementar este sistema. Cabe mencionar que para este tipo de sistemas es importante incluir una pantalla LCD, ya que a medida que avanza la ejecución del programa, se imprimen mensajes que permiten la interacción con el usuario.

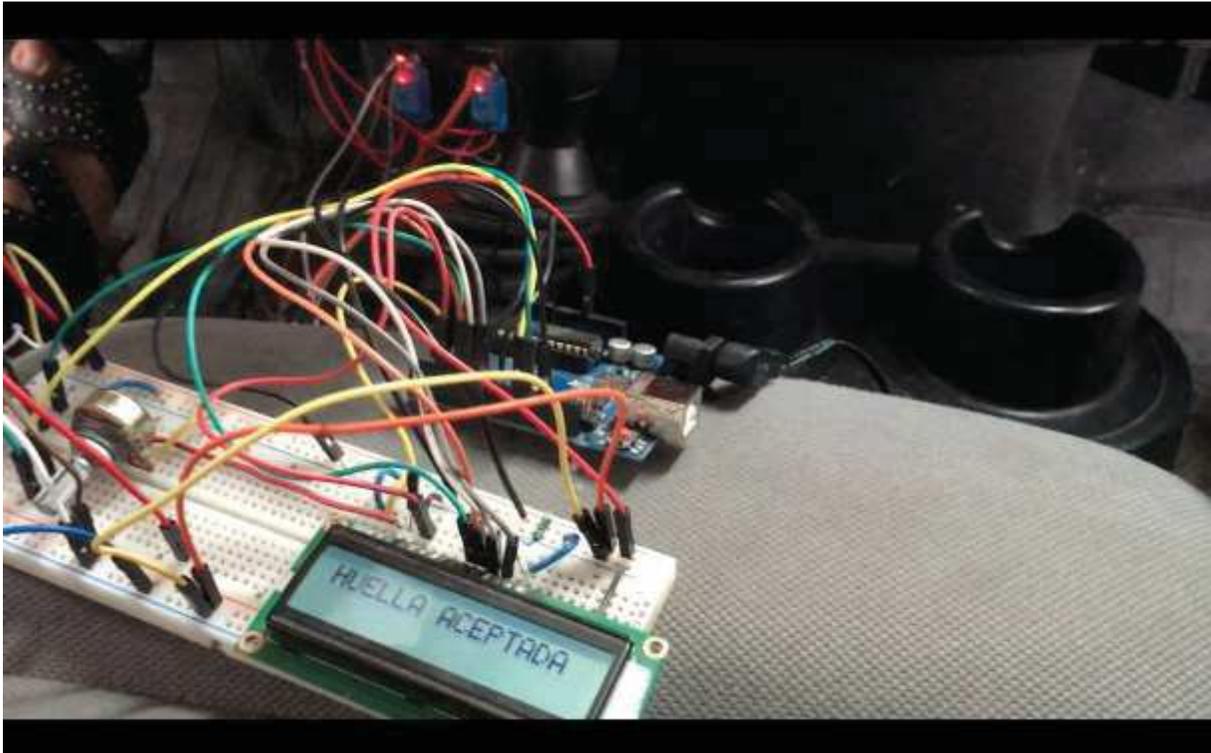
### Primero Paso.



**Figura 1. Detección de huella dactilar.**

La ejecución del primer paso consta básicamente de la detección de la huella dactilar. En un sistema biométrico con reconocimiento de huella dactilar de este tipo, todas las huellas introducidas serán leídas, pero antes de poder ser aceptada una huella, se debió llevar a cabo el proceso de registro.

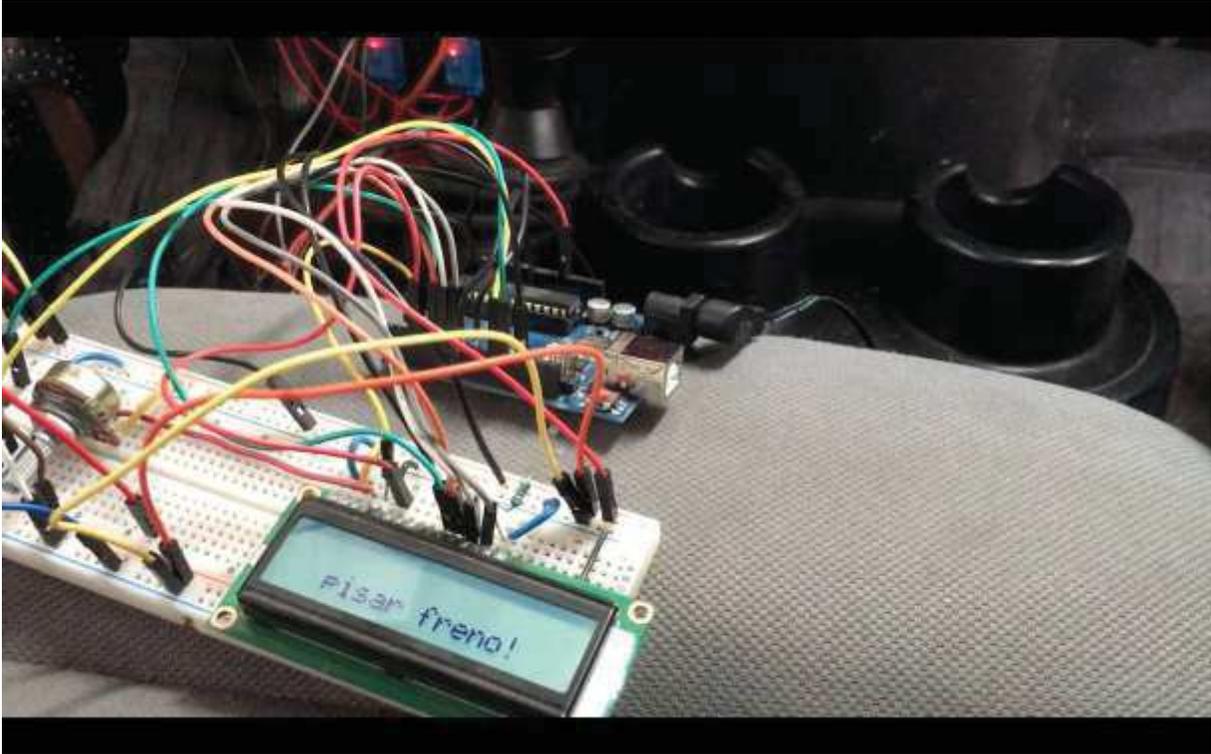
## Segundo Paso.



**Figura 2. Primer mensaje arrojado mostrado a través del LCD.**

Después de que se aceptó la huella, el mensaje leído es “HUELLA ACEPTADA”. Como se puede apreciar, esto es después de que la huella supera el sistema de seguridad biométrico y es aceptada. Permite ejecutar el resto del programa que desembocará en el encendido del automóvil. En este paso, la ignición es dada al tiempo que la huella es aceptada, y se procede a verificar los pasos 3 y 4.

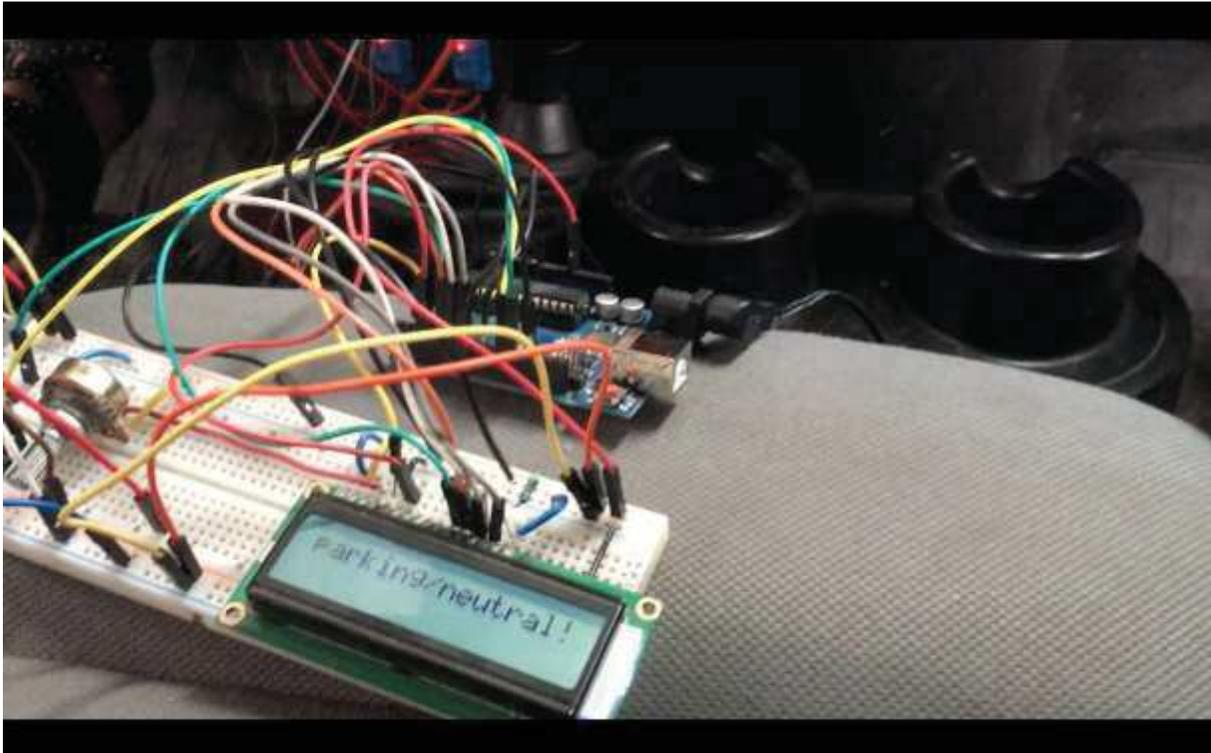
### Tercer Paso.



**Figura 3. Primera condición antes del encendido.**

Se imprime el mensaje que advierte la aplicación del pedal de freno. Es importante considerar esta condición siempre que se pretenda llevar a cabo el encendido de un vehículo. Es una condición que se aprecia en los autos hoy en día sin que se utilice biometría de por medio, es una condición de seguridad.

#### Cuarto Paso.

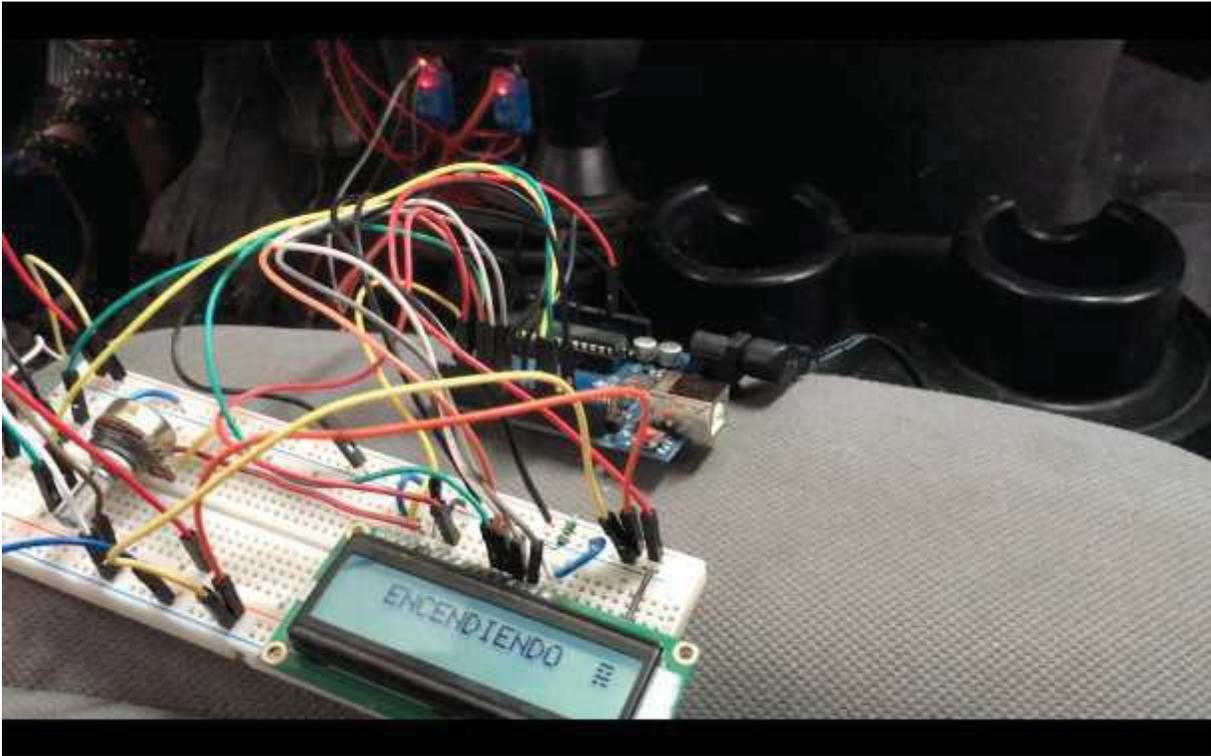


**Figura 4. Segunda condición antes del encendido.**

Se imprime el mensaje que advierte la correcta posición del estado de la transmisión del vehículo antes del encendido. De igual forma es importante considerar esta condición, tal como el paso anterior, siempre que se pretenda llevar a cabo el encendido de un vehículo. Así de igual forma se aprecia en los autos hoy en día sin que se utilice biometría de por medio, es una condición de mayor seguridad. Encender arbitrariamente un vehículo de transmisión automática sin considerar la posición del selector de velocidades podría causar graves daños.



### Quinto Paso.



**Figura 5. Ejecución de la puesta en marcha.**

Cuando se han cumplido las condiciones y con la ignición dada, se imprime el mensaje que se aprecia en la imagen, al tiempo que el vehículo ejecuta un ciclo de arranque y se pone en marcha. En este paso, el vehículo puede funcionar de manera normal, con todas las funciones marchando a la perfección.

### Ultimo Paso.



**Figura 6. Final**

Para concluir, el último paso se refiere detener la marcha del auto. De la misma manera que se puso en marcha, si la huella cumple los requisitos predeterminados, se dejara de suministrar voltaje de ignición al motor, por consiguiente se apagará y terminará ese ciclo de encendido. Imprimiendo en pantalla un mensaje de despedida.



## 6. Conclusiones

Con ayuda de las nuevas tecnologías emergentes en el sector de la seguridad biométrica se puede conseguir realizar tareas ya existentes con un mayor nivel de rapidez, seguridad y versatilidad como lo es el encendido de un vehículo utilizando la huella dactilar.

La sección del montaje exige especial cuidado, ya que una conexión inestable es motivo de pérdidas en todos los sentidos, tanto eléctrica como electrónicamente, elevando exponencialmente la existencia de una falla en la puesta en marcha del automóvil, falla que seguramente no se presentaría de no estar dotado de un sistema de encendido mediante biometría. Ocasionando un perjuicio ajeno a la ingeniería original del vehículo y un perjuicio de la efectividad del sistema biométrico.

El sistema de transmisión montado de serie en el vehículo (estándar o automático) no limita la instalación de un sistema de éste tipo ya que simplemente cambiaran las condiciones a tomar referencia de sensores colocados en la palanca de posición de la transmisión que garantizan una posición correcta, a los colocados en el pedal de embrague que advierten una posición neutral de la caja de cambios.

El sector automotriz emplea protocolos de comunicación para mantener accesible la información de a bordo de cada vehículo, debido a los estándares que se han tenido que desarrollar para este rubro. Cabe mencionar que bajo el sistema de encendido a través de la huella dactilar, no se ve comprometida la información de a bordo que por decreto debe estar accesible, ni se compromete la información personal del usuario.

## 7. Referencias

- [1] Jain A. Hong L. Pankanti S. "*Biometric Identification*", *Communications of the ACM*. Vol. 43, No. 2, pág. 91-98, año 2000.
- [2] Rouse M. 2013 "*Tech Target*", consultado en Enero 6, 2017, Recuperado de SearchSecurity: <http://searchsecurity.techtarget.com/definition/biometrics>
- [3] Jain K, Ross A. "Introduction to Biometrics". In Jain, AK; Flynn; Ross, A. *Handbook of Biometrics*. Springer. pp. 1–22. 2008
- [4] O’Gorman L. "*Comparing Passwords, Tokens, and Biometrics for User Authentication*" (2003).
- [5] Jain A. Bolle R. Pankanti S. "*Biometrics: Personal Identification in Networked Society.*", *Kluwer Academic Publication*, año 2000.
- [6] Bleicher P. "*Biometrics comes of age: despite accuracy and security concerns, biometrics are gaining in popularity.*", año 2005.
- [7] Corona L.; Abarca, G.; Mares, J., *Sensores y Actuadores. Aplicaciones con Arduino, Primera Edición, Grupo Editorial Patria, S.A. de C.V.*, pp. 20-45.
- [8] García F, Sierra J, Guzmán V. "*Simulación de Sistemas*", *CECSA*, Primera edición, pág. 8, año 2005.



# Simulación de un modelo dinámico para evaluar el crecimiento de la tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus*)

López Hernández Tomas, Martínez Hernández Ignacio, Mancilla Morales José Arturo, Ortega Cosme Gregorio.

Instituto Tecnológico de Tecamatlán.

## Resumen

*Los modelos matemáticos han permitido realizar el estudio, predicción y análisis de un sistema mediante simulación dinámica. Aunque estos modelos se aplican comúnmente en ciencias exactas, también pueden usarse en sistemas biológicos, como es para determinar el crecimiento de peces sin la necesidad de esperar todo el ciclo de producción. Con base en lo anterior el objetivo de este trabajo fue evaluar dos modelos de crecimiento, el de von Bertalanffy y Logístico para determinar el crecimiento de la tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus*). El experimento se realizó en las instalaciones del Instituto Tecnológico Tecamatlán tomando datos de talla y peso durante 463 días, durante tres periodos de crecimiento. Los datos en conjunto con el modelo matemático fueron analizados en el lenguaje de programación MatLab®. Para encontrar los valores de los parámetros que permitían ajustar las simulaciones y las mediciones en los tres periodos se realizó la calibración mediante la técnica de mínimos cuadrados no lineales. Los resultados en conjunto con datos estadísticos muestran que con las técnicas utilizadas se encontraron los valores de los parámetros que permiten el mejor ajuste de las simulaciones con respecto a las mediciones. Se puede afirmar que los modelos utilizados permiten determinar el crecimiento de la tilapia nilótica bajo las condiciones estudiadas.*

**Palabras clave:** Simulación, modelo matemático, calibración, parámetros, tilapia.

## 1. Introducción

Una de las principales especies pesqueras producidas en granjas acuícolas en México, de mayor consumo y popularidad, es la tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus*), la cual contribuye a la soberanía alimentaria en beneficio de la población del país [1].

Esta especie tiene gran importancia como fuente de proteína beneficiando particularmente a países en desarrollo. Por otro lado es uno de los de mayor rentabilidad dentro de la acuicultura debido a su rápido crecimiento y adaptación a diferentes condiciones climáticas [2]. En el 2017, México se ubicó en el noveno lugar con una producción de 117,806 toneladas, distribuidas en 4,623 granjas acuícolas, contribuyendo con el 1.8 por ciento de la producción mundial [3].

Puebla ocupa el segundo lugar en producción acuícola de Estados sin litorales, lo que representa una producción de mil 082 toneladas, en 123 granjas en el estado, únicamente de esta especie [4].

Dentro de los costos para producir la tilapia, el alimento es el que más costo económico requiere, entre 55 a 71 % dependiendo del sistema de producción, afectando directamente las ganancias de su producción [5].

Una de las funciones de producción más importantes en los sistemas dedicados a la producción de tilapia, es la trayectoria del proceso de crecimiento definido como el cambio de una magnitud en



función del tiempo. En este contexto el peso y la longitud total de esta especie son variables de gran interés para los productores, pues son estas junto con la mortalidad, las que definen la producción neta de biomasa durante un ciclo comercial de producción [6].

Una de las formas para estudiar y predecir dichas variables de interés es mediante la simulación dinámica. Aunque cuando se habla de este tema el primer ámbito de aplicación es la ingeniería, en todos los campos científicos es necesario la instrumentación para la obtención de datos. Por lo que la electrónica puede aplicarse a cualquier rama de la ingeniería, como en agronomía [7, 8, 9]. Estas herramientas permiten predecir el crecimiento de los animales y la exploración de la dinámica de su composición corporal, junto con la determinación de la eficiencia de flujo de materia y energía en el animal [6].

La aparición de los modelos matemáticos de simulación aplicados a los sistemas biológicos fue en la década de 1950, con modelos que representaban una descripción de los procesos involucrados. A mediados de los años 60's del mismo siglo aparecen los modelos dinámicos para explicar y mejorar la comprensión de procesos biológicos, los cuales consideran el tiempo dentro de las ecuaciones matemáticas. Los precursores de esto son W.G. Duncan en la Universidad de Kentucky y C.T. de Wit en la Universidad de Agricultura de Wageningen [10, 11].

Con base a lo anterior el objetivo de este trabajo fue evaluar un modelo dinámico para determinar el crecimiento de la tilapia, para predecir el peso y la talla, con la finalidad de que se puedan predecir eventos, sin la necesidad de tener la especie directamente.

## 2. Materiales y métodos

La presente investigación se llevó a cabo dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico de Tecamatlán, en el área acuícola del sector pecuario, ubicado en Carretera Palomas - Tlapa km 19.5 en Tecamatlán, Puebla, ubicado entre los paralelos 17° 54' y 18° 08' de latitud norte; los meridianos 98° 14' y 98° 24' de longitud oeste, a una altitud entre 900 msnm (12, 13).

La toma de datos se realizó en un tiempo de 463 días en periodos que abarcaron del 28 de junio al 01 de noviembre de 2016, del 22 de agosto al 26 de diciembre de 2016 y el último del 6 de diciembre de 2016 al 04 de julio de 2017.

Se utilizaron dos estanques de tierra en forma rectangular revestidos de geomembrana, con dimensiones de 16m x 8m x 1.5m de profundidad y un volumen de 134 m<sup>3</sup> y 16m x 8m x 1.9 m de profundidad con volumen de 168 m<sup>3</sup>. Se suministró agua procedente del subsuelo con ayuda de una electro bomba de 5 Hp<sup>1</sup>, con un sistema de aireación FatCat<sup>2</sup> durante la primera etapa (1 a 90g) mediante un Blower<sup>3</sup> de 1 hP, y durante la segunda etapa (91 a 250g) se utilizó un aireador de inyección de 2 hP.

Para el primer periodo de engorda se adquirieron 3,000 alevines<sup>4</sup> de tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus*), 2,700 para el segundo y 2,000 para el tercero, los cuales fueron comprados ya revertidos sexualmente (masculinizados). Los alevines contaban con 30 días de nacidos y presentaban un peso promedio de 1 g.

La densidad de siembra para el primer periodo de engorda fue de 22 alevines por m<sup>3</sup> durante la etapa de crecimiento (1 a 90g), una vez alcanzado el peso se realizó un desdoble el día 23 de agosto separando aquellos organismos con peso mayor a 90g, seleccionando 2,000 de estos los cuales fueron colocados en otro estanque, con una densidad de 12 organismos por m<sup>3</sup>. Para el segundo

---

<sup>1</sup> Caballos de fuerza

<sup>2</sup> Serie de difusores conectados a una tubería de aire y un soplador

<sup>3</sup> Soplador monofásico

<sup>4</sup> Estado larval de peces desde la eclosión hasta el final de la dependencia del vitelo como fuente de nutrición



periodo la densidad de siembra fue de 20 organismos por m<sup>3</sup>, durante este periodo no se realizó desdoble. Para el tercer periodo la densidad de siembra fue 15 organismos por m<sup>3</sup> durante la etapa de crecimiento (1 a 90g), una vez alcanzado el peso se realizó un desdoble el día 14 de marzo de 2017 separando los organismos con peso mayor a 90g, seleccionando 1,500 de estos organismos los cuales fueron colocados en otro estanque con una densidad de siembra de 9 organismos por m<sup>3</sup>. La finalización del estudio en la engorda uno y dos fue a las 18 semanas y para el caso de la engorda 3 se tomaron datos hasta la semana 29 con el fin de mostrar mejor el crecimiento sigmoideo en el caso del peso.

Durante el estudio en las engorda uno y dos se utilizó un sistema de alimentación por fases en el cual la transición de una dieta a otra se realizó cuando los animales lograron en promedio un determinado peso objetivo según las recomendaciones del plan de alimentación de la empresa Purina® hasta haber alcanzado las 18 semanas de vida.

**Tabla 1. Tipo y frecuencia de alimentación durante la primera y segunda engorda**

Tipo de alimento	Peso promedio del pez (g)	Proteína %	Tiempo (Semanas)	Frecuencia de Alimentación (día)
Iniciación migaja (menor a 1.0 mm)	2-4	45	1-2	10
Desarrollo (1.5 mm)	5-30	35	3-8	9
Desarrollo (2.4 mm)	31-60	33	9-10	8
Desarrollo (3.5 mm)	61-150	35	11-15	7
Engorda (4.8 mm)	151-350	30	16-18	6

Para el estudio de la engorda tres también se utilizó el sistema de alimentación por fases recomendado por la empresa Purina® y el experimento se llevó hasta 29 semanas de vida.

**Tabla 2. Tipo y frecuencia de alimentación durante la tercera engorda**

Tipo de alimento	Peso promedio del pez (g)	Proteína %	Tiempo (Semanas)	Frecuencia de Alimentación (día)
Iniciación migaja (menor a 1.0 mm)	2-4	45	1-2	10
Desarrollo (1.5 mm)	5-30	35	3-8	9
Desarrollo (2.4 mm)	31-60	33	9-10	8
Desarrollo (3.5 mm)	61-150	35	11-15	7
Engorda (4.8 mm)	151-350	30	16-18	6
Engorda (5.5 mm)	351-506	30	19-22	6
Engorda (7.5mm)	507 y más	30	23-29	5

Los recambios de agua fueron totales y parciales. Los totales se realizaron cada 7 días, para los parciales se realizó cada tercer día vaciando una tercera parte del volumen total del estanque, posteriormente se procedió a rellenarlo con agua limpia, esto con la finalidad de evitar enfermedades fúngicas y bacterianas que pudieran provocar la acumulación de sólidos.

Durante el inicio de cada engorda, se tomó una muestra al azar, de 50 organismos, posteriormente se pesaron en una báscula electrónica de la marca AE ADAM®, con capacidad de 48 kg con una legibilidad de 2g obteniendo el peso y dividiéndolo entre el número de peces para determinar el peso promedio de la población, capturando en un registro durante todo el periodo. Para la variable talla se tomaron los mismos 50 organismos que se utilizaron para el peso y se procedió a medirlos desde la boca hasta la base de la cola para después calcular el promedio.



## 2.1 Modelos matemáticos para evaluar el crecimiento de tilapia

Se utilizaron los modelos de von Bertalanffy y Logistic, los cuales fueron programados en el lenguaje de programación MATLAB®, el cual permite programar ecuaciones de un modelo matemático en forma de código mediante un archivo tipo *m*.

Para el análisis de las magnitudes de longitud se empleó la ecuación propuesta por von Bertalanffy:

$$\frac{dLi}{dt} = k(Lm - Li) \quad (1)$$

Cuya solución analítica puede ser expresada de la siguiente manera:

$$Lt = (Li - Lm)\varepsilon^{-kt} + Lm \quad (2)$$

Donde  $Lt$  es la longitud total del pez en el tiempo  $t$ ,  $Lm$  es la longitud máxima teórica,  $Li$  es la longitud en  $t=0$  y  $k$  es la constante de velocidad de crecimiento.

Para la variable de peso corporal se utilizó la ecuación del modelo Logistic:

$$Pt = \frac{P_{\infty}}{(1 + b * \varepsilon)^{-c*t}} \quad (3)$$

Donde  $Pt$  es el peso de acuerdo a la edad,  $P_{\infty}$  es el peso adulto,  $b$  es un parámetro de ajuste del modelo,  $c$  es la tasa de maduración y  $t$  es la edad en días. Este modelo puede ser usado para crecimientos de tipo sigmoideo, en los cuales el punto de inflexión es del 50% al peso adulto. [13].

Las ecuaciones del modelo, así como las de calibración fueron implementadas en código *.m* de MatLab® permitiendo la identificación de los valores de los parámetros que dan un mejor ajuste entre las simulaciones y mediciones en los tres periodos de engorda en estudio.

La calibración se realizó por el método de mínimos cuadrados no lineales, el cual esta descrito mediante una función a minimizar de la siguiente forma:

$$f(x) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m r_j^2(x) \quad (4)$$

Donde  $x = (x_1 \dots x_n)$   $r_j$  residuales  $m \geq n$ ;  $r(x) = (r_1(x_1) \dots r_n(x_m))$

$$\Rightarrow f(x) = \frac{1}{2} \|r(x)\|^2 \quad (5)$$

Para calcular la matriz Jacobiana se tiene la siguiente estructura:

$$J(x) = \frac{\partial r_j}{\partial x_i}, \quad 1 \leq j \leq m, \quad 1 \leq i \leq n \quad (6)$$

$$\nabla f(x) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m r_j(x) \nabla r_j(x) = J(x)^T r(x) \quad (7)$$



$$\nabla^2 f(x) = J(x)^T J(x) + \sum_{j=1}^m r_j(x) \nabla^2 r_j(x) \quad (8)$$

El método de mínimos cuadrados no lineales está implementado en Matlab®, mediante la función “lsqnonlin”.

La función “lsqnonlin” utiliza las siguientes funciones: [X, RESNORM, RESIDUAL, EXITFLAG, OUTPUT, LAMBDA, JACOBIAN], las cuales determinan la matriz Jacobiana de los modelos utilizados.

La función “lsqnonlin” la cual llama al modelo sin calibrar, declarando los parámetros que se desean estimar, a los cuales se le asignan valores límites inferiores y superiores, de acuerdo a aquellos valores nominales de que son posibles sin sobre estimar el sistema [11].

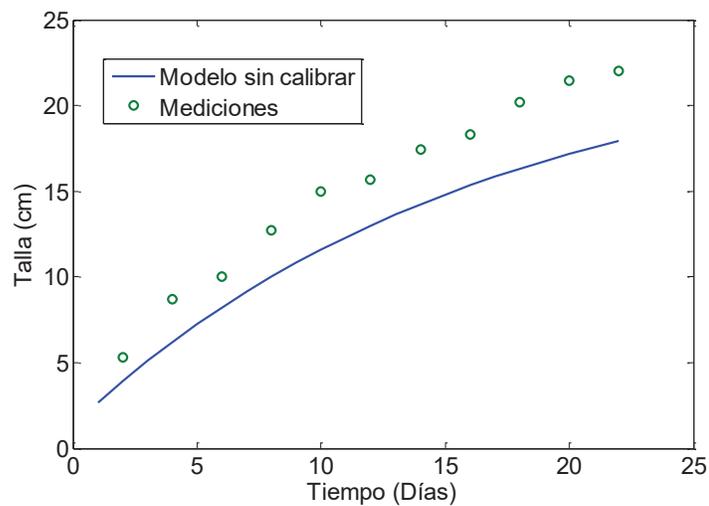
### 3. Resultados y discusión

La simulación permitió demostrar que los valores encontrados en la literatura no corresponden a los datos medidos en el experimento (Figura 1 y 2), por lo que se realizó la calibración del modelo, en donde se encontraron los valores de los parámetros para determinar la talla (Tabla 3) y el peso (Tabla 4) de las tilapias para cada una de las engordas que daban el mejor ajuste entre los datos simulados y medidos. Se utilizaron cinco parámetros, más uno adicional (a) el cual permitió realizar un mejor ajuste a la ecuación propuesta por von Bertalanffy.

**Tabla 3. Estimación de los parámetros del modelo de van Bertalanffy para determinar la talla.**

Parámetros	Primer periodo de engorda	Segundo periodo de engorda	Tercer periodo de engorda
A	2	10	28
K	0.12	0.12	0.12
Li	1.381	1.381	1.381
Lm	24	25	35

b:Parámetro de ajuste, c: Tasa de maduración y Pa: Peso adulto



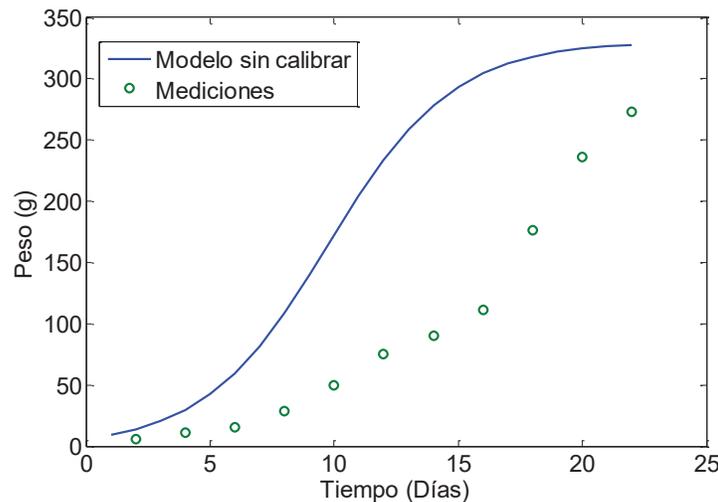
**Figura 1. Simulaciones y mediciones de la talla.**



**Tabla 4. Estimación de los parámetros del modelo Logistic para determinar el peso.**

Parámetros	Primer periodo de engorda	Segundo periodo de engorda	Tercer periodo de engorda
B	50	50	30
C	0.2	0.02	0.02
Pa	330	360	890

a: Parámetro de ajuste, k: Coeficiente de crecimiento, Li: Edad hipotética en la que la longitud es igual a 0, Lm: Longitud asintótica.



**Figura 2. Simulaciones y mediciones de peso**

### 3.1 Primer periodo de engorda

En el primer periodo de engorda la simulación del modelo von Bertalanffy para estimar la talla, así como el modelo Logistic para determinar el peso, fueron evaluados mediante métodos estadísticos antes y después de la calibración, como el coeficiente de determinación  $R^2$ , error cuadrático medio (MSE), raíz del error cuadrático medio (RMSE), media del error absoluto (MAE), promedio de la diferencia entre los datos medidos y calculados (BIAS), coeficiente de variación (CV) y varianza (VAR). Estos datos se muestran en la Tabla 5.

Los resultados mostrados en la Tabla 5 mostraron que existe una mejora en el ajuste de las variables de salida después de la calibración en las simulaciones del primer periodo de engorda. Para el caso del peso, en el cálculo de  $R^2$  después de realizar la calibración este coeficiente fue cercano al valor 1, lo que indica un buen ajuste entre las mediciones y las simulaciones. El MSE después de la calibración disminuyó, es decir que se redujo el promedio de los errores al cuadrado de las mediciones y las simulaciones.

El BIAS para las variables estudiadas antes de la calibración era mayor, después de realizar la identificación paramétrica este valor disminuyó, por lo que también este método estadístico indica un mejor ajuste después de la calibración. Para el CV se observa que los valores de referencia aumentaron con respecto a los mostrados antes de la calibración indicando que existe mayor heterogeneidad en los valores de esta variable. La varianza para la variable de peso aumento



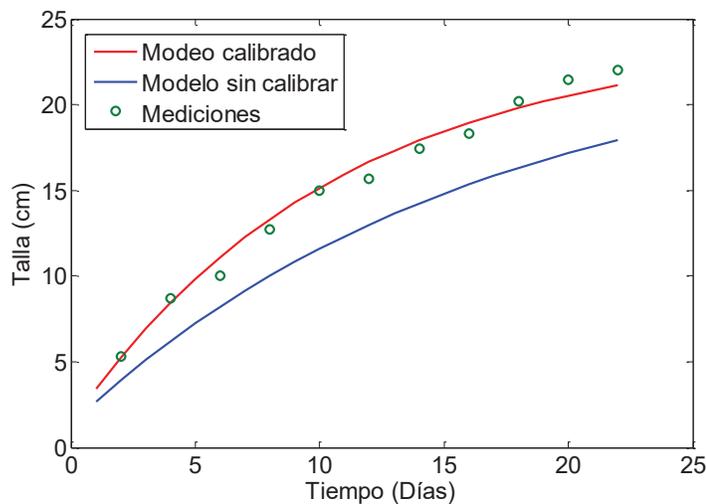
después de la identificación paramétrica lo que indica que los valores de esta variable presentan una mayor dispersión.

**Tabla 5. Evaluación de los modelos de predicción para el primer periodo.**

Estadísticos	MODELOS			
	Von Bertalanffy (Talla)		Logistic (Peso)	
	Sin calibrar	Calibrados	Sin calibrar	Calibrados
R <sup>2</sup>	0.9945	0.9747	0.7377	0.9741
MSE	9.6574	2.3786	13,907	392.7175
RMSE	3.1076	1.5423	117.9262	19.8171
MAE	2.9833	1.2973	99.9538	11.8548
BIAS	-2.9833	-1.2973	99.9538	-11.3744
CV	0.3961	0.3437	0.6502	0.9256
VAR	21.9024	30.2986	15,282	8,995

Para el caso de la talla el cálculo de R<sup>2</sup> antes de calibración fue más alto que después de calibración, esto debido a que al calcular los datos con la ecuación propuesta por von Bertalanffy sólo nos muestra un mejor ajuste en cuanto a esa ecuación y no a las mediciones realizadas durante el experimento, para una mejor visualización de este comportamiento los resultados se muestran en la Figura 2. El MSE después de realizar la calibración disminuyó, reduciendo el promedio de los errores al cuadrado de las mediciones. El BIAS disminuyó después de la calibración de las mediciones mostrando un buen ajuste. El CV disminuyó después de la calibración de las mediciones indicando una menor heterogeneidad en los valores de la variable. La varianza aumento en la variable talla indicando que existe una menor dispersión entre los valores de esta variable.

Para comprobar que la identificación de parámetros se realizó correctamente se graficaron los datos antes y después de la calibración. Esta información se presenta en la Figura 3 y 4 para la talla y peso del primer periodo de engorda respectivamente.



**Figura 3. Modelo calibrado y sin calibrar de la talla en el primer periodo de engorda.**

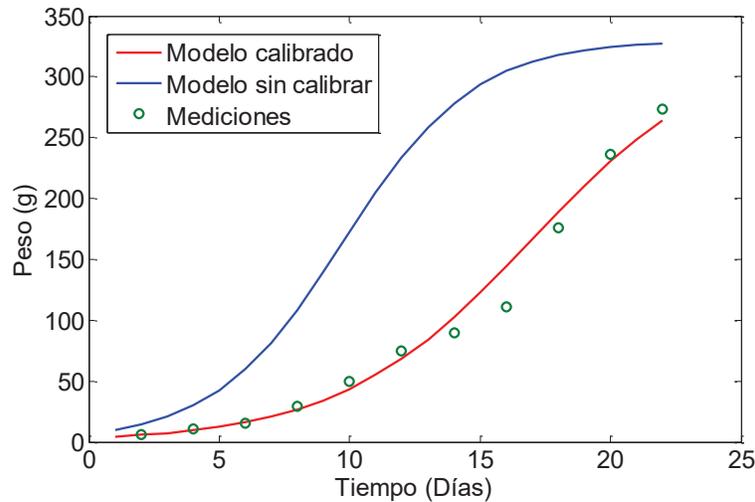


Figura 4. Modelo calibrado y sin calibrar del peso para el primer periodo de engorda.

### 3.2 Segundo periodo de engorda

En el segundo periodo de engorda se evaluó cada uno de los modelos para estimar la talla obtenida mediante el modelo de von Bertalanffy y el peso mediante el modelo Logistic, por medio de: coeficiente de determinación  $R^2$ , error cuadrático medio (MSE), raíz del error cuadrático medio (RMSE), media del error absoluto (MAE), promedio de la diferencia entre los datos medidos y calculados (BIAS), coeficiente de variación (CV) y varianza (VAR). Esta información se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Evaluación de los modelos de predicción para el segundo periodo de engorda.

Estadísticos	MODELOS			
	Von Bertalanffy (Talla)		Logistic (Peso)	
	Sin calibrar	Calibrados	Sin calibrar	Calibrados
$R^2$	0.9835	0.9839	0.5996	0.9539
MSE	5.2630	1.2446	21,862	862.2717
RMSE	2.2941	1.1156	147.8593	29.3645
MAE	2.1456	0.8871	119.6009	22.1936
BIAS	-2.1456	0.1380	119.6009	-11.9582
CV	0.3919	0.3652	0.5528	0.8872
VAR	30.4027	34.7837	17,976	13,123

Los resultados mostrados en la Tabla 6 mostraron que existe una mejora en el ajuste de las variables de salida después de la calibración en las simulaciones del segundo periodo de engorda. Para el caso de ambas variables de talla y peso al calcular el  $R^2$  después de la calibración fue cercano a 1 indicando un buen ajuste entre las mediciones y las simulaciones. El MSE después de la calibración disminuyó para ambas variables reduciendo el promedio de los errores al cuadrado de las mediciones y las simulaciones. El BIAS para las variables talla antes de la calibración aumentó y para el caso de la variable de peso disminuyó. Para el CV se observa que los valores de referencia disminuyeron para la variable talla con respecto a los mostrados antes de la calibración indicando que existe mayor heterogeneidad en los valores de esta variable y para el caso del peso aumentó mostrando una mayor heterogeneidad en los valores de esta variable. La varianza para la variable talla aumento después de la identificación paramétrica lo que indica que los valores de esta variable



presentan una mayor dispersión, y para el caso de la variable de peso este estadístico disminuyó indicando que los valores de esta variable presenta una menor dispersión.

Para determinar que en este periodo la identificación de parámetros se realizó de manera correcta se graficaron los datos de simulación antes y después de la calibración. Esta información se presenta en la Figura 5 y 6 para la talla y peso respectivamente durante el segundo periodo de engorda.

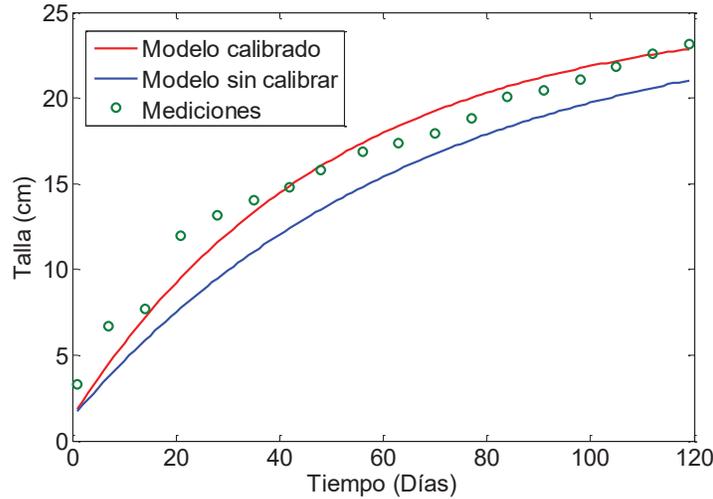


Figura 5. Modelo calibrado y sin calibrar de la talla en el segundo periodo de engorda

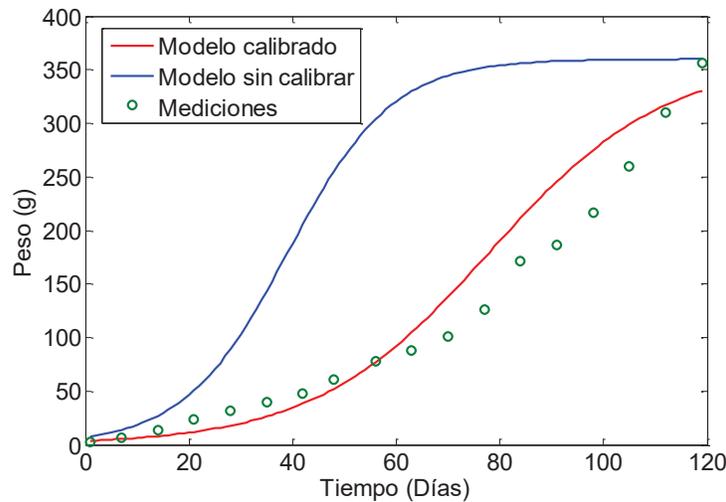


Figura 6. Modelo calibrado y sin calibrar de la talla en el segundo periodo de engorda

### 3.3 Tercer periodo de engorda

Para el tercer periodo se evaluaron las simulaciones antes y después de la calibración mediante los métodos estadísticos mostrados en la Tabla 7. Los resultados demuestran que existió una mejora en el ajuste de las variables de salida después de la calibración con respecto a las simulaciones obtenidas antes de calibrar. Después de la calibración el valor de  $R^2$  fue cercano a 1 indicando un buen ajuste entre las mediciones y las simulaciones. El MSE después de la calibración disminuyó para



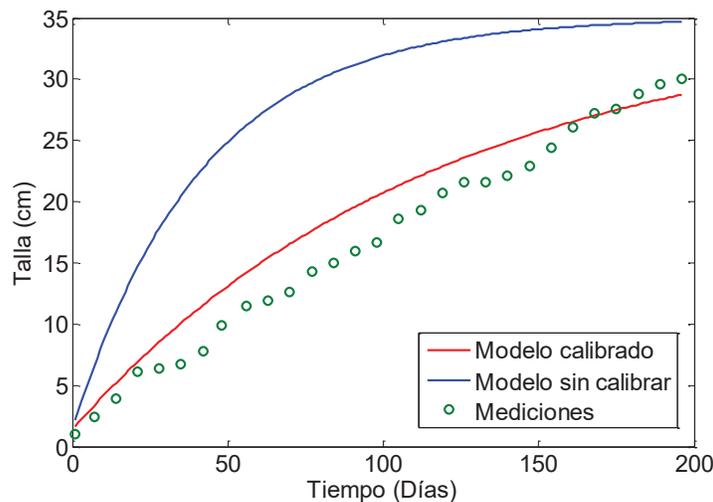
ambas variables reduciendo el promedio de los errores al cuadrado de las mediciones y las simulaciones.

**Tabla 7. Evaluación de los modelos de predicción para el tercer periodo de engorda.**

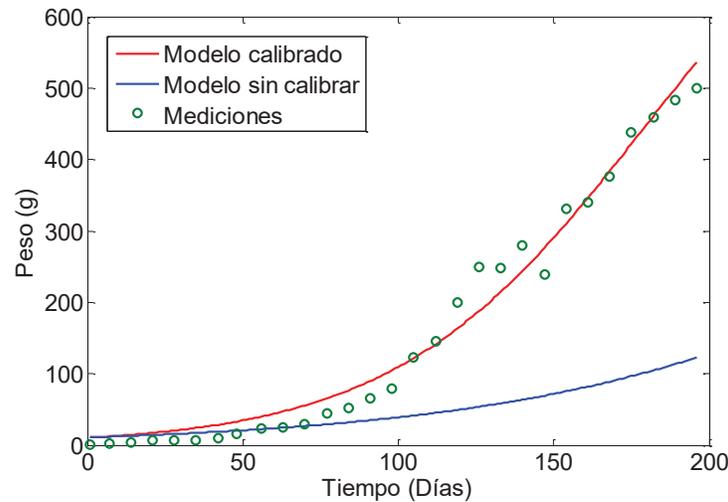
Estadísticos	MODELOS			
	Von Bertalanffy (Talla)		Logistic (Peso)	
	Sin calibrar	Calibrados	Sin calibrar	Calibrados
<b>R2</b>	0.7911	0.9697	0.9784	0.9813
<b>MSE</b>	136.7301	6.2266	32032	572.3334
<b>RMSE</b>	11.6932	2.4953	178.9749	23.9235
<b>MAE</b>	10.9375	2.1972	121.6227	20.0108
<b>BIAS</b>	10.9375	-1.9483	-116.8715	-5.5983
<b>CV</b>	0.2959	0.4102	0.6609	0.9357
<b>VAR</b>	68.6511	59.3934	994.4736	24,766

El BIAS para ambas variables se redujo por lo que este estadístico ayudo a un mejor ajuste. Para el CV se observa que los valores de referencia aumentaron con respecto a los mostrados antes de la calibración indicando que existe una menor heterogeneidad entre los valores simulados y las mediciones. La varianza para la variable talla disminuyó después de la identificación paramétrica lo que indica que los valores de esta variable presentan una menor dispersión, y para el caso de la variable de peso este estadístico aumentó indicando que los valores de esta variable presenta una mayor dispersión.

Para comprobar lo anterior se graficaron las simulaciones antes y después de la calibración (Figura 7 y 8).



**Figura 7. Simulación de la talla antes y después de calibrar en el tercer periodo de engorda.**



**Figura 8. Simulación del peso antes y después de calibrar en el tercer periodo de engorda.**

Como se ha mostrado en los tres periodos de engorda el crecimiento de las tilapias con fines comerciales puede estimarse por estos modelos y resulta conveniente para estudiar la posibilidad de mejorar las variables de peso y talla presentadas en este trabajo

#### 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten establecer que en un modelo matemático que permite simular el comportamiento de un sistema es necesario contar con los valores de los parámetros que permitan validar las predicciones con las mediciones que se tomaron durante el estudio. Esto se hace más necesario cuando se estudian sistemas biológicos como el de la tilapia.

La técnica de mínimos cuadrados no lineales permitió encontrar los valores de los parámetros que mejor ajustan las simulaciones con respecto a las mediciones.

Las simulaciones obtenidas permiten predecir y estimar el crecimiento y peso de la tilapia bajo las condiciones establecidas en el experimento. Esto se afirma al utilizar los parámetros encontrados y evaluados y validados en las tres etapas de engorda presentadas.

#### Referencias

- [1] SAGARPA<sup>1</sup> (2017). Comunicado de prensa. México entre los diez primeros lugares a nivel mundial en producción de tilapia. Ciudad de México. México. SAGARPA.
- [2] SAGARPA<sup>2</sup> (2017). Comunicado de prensa. Avanza México como una potencia en producción acuícola. La Paz. Baja California. México. SAGARPA.
- [3] SAGARPA (2012). Carta nacional acuícola. México. SAGARPA. SAGARPA (2016). Coordinación de Comunicación Social. Puebla, segundo lugar en nacional en producción de tilapia. Puebla. México.
- [4] SAGARPA (2016). Coordinación de Comunicación Social. Puebla, segundo lugar en nacional en producción de tilapia. Puebla. México.
- [5] Usgame, Z. D., Usgame, Z.G., Valverde, B. C. (2007). Agenda productiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de la tilapia. Bogotá, Colombia.



- [6] Aguilar, A. F.A., (2010). *Modelos matemáticos no lineales como herramienta para evaluar el crecimiento de tilapia roja (Oreochromis spp.) y tilapia nilótica (Oreochromis niloticus Var. Chitralada)* alimentadas con dietas peletizadas o extruidas. Tesis para optar al título de Magister en Producción Animal. Universidad nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- [7] Pear M. R, Cuary R. B. (1998) Agricultural systems modeling and simulation. The University of Florida, Gainesville, Florida. Edit Marcel Dekker Inc. 143 p.
- [8] Pérez, A., Milla, M., Mesa, M. (2006). Impacto de las tecnologías de la información y la comunicación en la agricultura. *Cultivos Tropicales*, 27(1): 11-18.
- [9] García, M. Á. P. (2014). Instrumentación electrónica. Ediciones Paraninfo, SA. España. 880 p.
- [10] Guevara, E.; Meira, S. (2000). "La Simulación del Desarrollo, Crecimiento y Rendimiento en maíz". INTA EEA Pergamino, Argentina.
- [11] Mancilla M. J. A. 2017. Desarrollo de un simulador del crecimiento de un cultivo de jitomate (*Lycopersicum esculentum* Mill) con aplicación de Nitrógeno para invernaderos de Aquixtla, Puebla. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados. 218 p.
- [12] INEGI (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Puebla. México. INEGI.
- [13] López C.I.L., Ramírez, A. A., Rojano, A. A. (2005). Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: Trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. *Revista Chapingo serie hortícola*, 11(2): 257-267.
- [14] SEMARNAT/CONABIO. (2015) Atlas social de Aquixtla. Estadísticas sociodemográficas. México. 62 p.

# Interferómetro de fibra óptica aplicado para controlar la posición de un sistema péndulo-hélice

F. Gutiérrez Zainos<sup>1</sup>, I. Romero Sosa<sup>1</sup>, A. Osorio Ignacio<sup>1</sup>, M. Sánchez Sánchez<sup>1</sup>, J. J. Carmona Rodríguez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad del Papaloapan Campus Loma Bonita Av. Ferrocarril s/n, San Antonio, Loma Bonita, Oax. 68400

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica de la Mixteca, Carretera a Acatlima Km. 2.5 Huajuapán de León, Oax., 69000

## Resumen

Se presenta una configuración de un interferómetro de Sagnac de fibra óptica con dos placas retardadoras colocadas de manera simétrica en el lazo. El arreglo se propone para controlar la posición angular de un sistema péndulo-hélice mediante la rotación de las placas retardadoras. El sistema basa su funcionamiento en controlar la amplitud del haz de salida del interferómetro rotando las placas las cuales varían los estados de polarización de la luz que viaja en el lazo de fibra. La amplitud de salida del interferómetro pasa primero por un detector y se manda a un amplificador de ganancia -1 y luego a un convertidor analógico digital, ambos contenidos en la tarjeta de desarrollo Spartan 3E 1600E. En el FPGA de la tarjeta se programan la ganancia del amplificador, la rutina de conversión de la señal analógica a señal digital, y un módulo PWM para controlar la velocidad del motor con hélice de tal forma que a cada ángulo de rotación de una de las placas retardadoras le corresponde un ancho de pulso que controla la velocidad del motor colocando al péndulo-hélice a un ángulo fijo.

**Palabras clave:** Interferómetro, fibra óptica, control, péndulo-hélice, FPGA.

## 1. Introducción

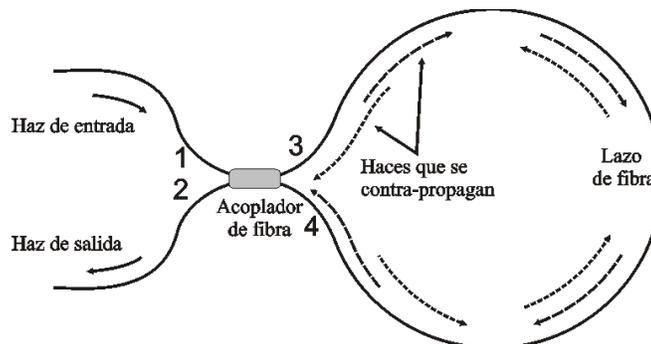


Figura 1. Esquema básico del interferómetro de Sagnac.



En la figura 1 se muestra el esquema básico del interferómetro de Sagnac de fibra óptica propuesto en 1981 por Bergh [1] y analizado en 1988 por Mortimore, este último muestra mediante ecuaciones matriciales su funcionamiento [2]. El esquema básico consta de un acoplador de fibra óptica de cuatro puertos con dos de los puertos (3 y 4) unidos por un lazo de fibra para formar un camino cerrado (lazo de fibra). Un haz de luz se introduce por uno de sus puertos y por las propiedades del acoplador, este se divide en dos haces que viajan en direcciones opuestas para entrar nuevamente al acoplador produciendo interferencia, cualquier diferencia de fase que adquieran los haces que se contra-propagan en el lazo producirán un cambio en el haz de salida. Dadas las características del interferómetro se ha propuesto como sensor de temperatura y rotación [3], sensor de temperatura [4], sensor acústico [5], en sistemas de monitoreo de fenómenos físicos rotacionales [6], como filtro selectivo de longitud de onda dentro de un sistema sensor de gas remoto [7], por mencionar algunas aplicaciones. Algunas investigaciones demuestran como una asimetría en polarización entre los haces contra propagándose puede proporcionar una diferencia de fase y producir una variación en la amplitud del haz de salida, hecho que fue demostrado por Kuzin [8]. Basándose en esto, O. Pottiez [9, 10] estudio una configuración del interferómetro Sagnac que incluye un acoplador simétrico, fibra altamente torcida en el lazo y una placa retardadora de fibra óptica de un cuarto de onda insertada en uno de los extremos del lazo demostrando que se puede ajustar fácilmente la amplitud del haz transmitido con tan solo rotar la placa. Pottiez [11] también empleó un haz de entrada polarizado circularmente y logró variar la amplitud del haz de salida en un rango amplio de valores ajustando solamente el ángulo de la placa retardadora de fibra. Nuestro trabajo retoma el esquema de Pottiez agregando una segunda placa retardadora en el lazo, ambas colocadas de manera simétrica en el lazo de fibra. Empleando como entrada al interferómetro un haz láser a 980 nm polarizado circularmente logramos variar con ambas placas retardadoras la amplitud de salida misma que conectamos a la entrada del convertidor analógico digital de la tarjeta FPGA Spartan 3E-1600. En esta se programó una máquina de estados como convertidor analógico digital y un modulador por ancho de pulso (PWM) de tal manera que al variar el ángulo de una de las placas, varía el ancho de pulso de la señal PWM que alimenta un motor provisto de una hélice suspendido en un péndulo (sistema péndulo-hélice), de tal forma que al rotar una placa el péndulo-hélice se posiciona a un determinado ángulo dependiendo la cantidad de grados que rote la placa. De particular interés es que al rotar la segunda placa retardadora el sistema péndulo-hélice regresa a su posición inicial, es decir, podemos lograr controlar la posición angular de un sistema péndulo-hélice con tan solo rotar las placas retardadoras de fibra óptica. Pensamos que nuestro esquema tiene futuras aplicaciones en sistemas de control de estabilidad o como sensor de posición angular.

## 2. Teoría del Interferómetro de Sagnac de fibra óptica con dos placas retardadoras

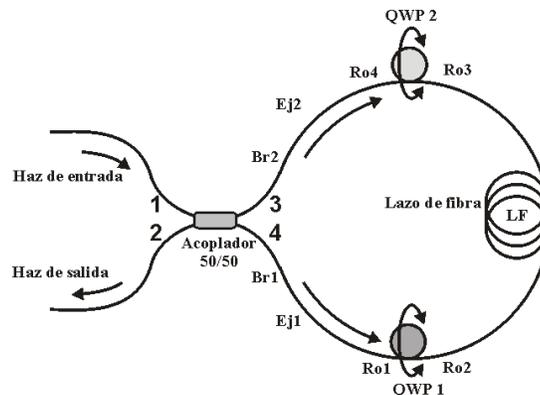


Figura 2. Interferómetro de Sagnac con dos placas retardadoras.



Retomando el trabajo de Pottiez [10, 11] colocamos una segunda placa retardadora de manera simétrica en el lazo del interferómetro. La figura 2 muestra el esquema del interferómetro propuesto. Se emplea un acoplador 50/50, dos placas retardadoras de un cuarto de onda QWP1 y QWP2, y fibra torcida en el lazo del interferómetro (FL). Para simular numéricamente el comportamiento del haz transmitido en relación con al grado de rotación de las placas retomamos el análisis numérico que realiza Ibarra [6]. Modelamos cada elemento que compone el lazo mediante matrices de Jones. En el esquema de la figura 2,  $B_{r1}$  y  $B_{r2}$  son las matrices que describen la birrefringencia y torsión de la fibra de los puertos 4 y 3 respectivamente modeladas mediante la matriz (1).

$$B_{ri} = \begin{pmatrix} \cos \eta_{Bi} - i(\delta_{l,Bi}/2) \operatorname{sen} \eta_{Bi} / \eta_{Bi} & (\delta_{c,Bi}/2) \operatorname{sen} \eta_{Bi} / \eta_{Bi} \\ -(\delta_{c,Bi}/2) \operatorname{sen} \eta_{Bi} / \eta_{Bi} & \cos \eta_{Bi} + i(\delta_{l,Bi}/2) \operatorname{sen} \eta_{Bi} / \eta_{Bi} \end{pmatrix}, i = 1, 2 \quad (1)$$

Donde,

$$\eta_{Bi} = \sqrt{(\delta_{l,Bi}/2)^2 + (\delta_{c,Bi}/2)^2}, i = 1, 2 \quad (2)$$

$(2\pi/\lambda)L_i\Delta n_i$  y  $\delta_{c,B} = 2(1 - g/2n)\tau$  es la retardancia lineal y retardancia circular respectivamente,  $L_i$  es la longitud de los brazos, la birrefringencia lineal de la fibra,  $\lambda$  es la longitud de onda del haz de entrada,  $n$  es el índice de refracción de la fibra, es un ángulo de torsión de la fibra de los puertos 3 y 4 en la sección donde se acopla la fibra que forma el lazo. El parámetro  $g$  encierra la birrefringencia circular y la torsión de la fibra, para fibras de silicio puede tomar valores entre 0.13 - 0.16 [12].

$E_{j1}$  y  $E_{j2}$  describen la orientación de los ejes principales de la fibra del acoplador con respecto a QWP1 y QWP2 respectivamente,  $\theta_i$  es un ángulo no conocido que se tiene al momento de empalmar la fibra.  $E_{j1}$  y  $E_{j2}$  están descritas por (3).

$$E_{ji} = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\operatorname{sen} \theta_i \\ \operatorname{sen} \theta_i & \cos \theta_i \end{pmatrix}, i = 1, 2 \quad (3)$$

La matriz  $R_{oi}$  dada por (4), describe la rotación de las placas QWP, donde es el ángulo de rotación de las placas.

$$R_{oi} = \begin{pmatrix} \cos \beta_i & -\operatorname{sen} \beta_i \\ \operatorname{sen} \beta_i & \cos \beta_i \end{pmatrix}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

LF describe la matriz del lazo de fibra con birrefringencia y torsión, matriz (5).

$$LF = \begin{pmatrix} \cos \eta - \pi L_n \operatorname{sen} \eta / \eta & \delta_c / 2 \operatorname{sen} \eta / \eta \\ -\delta_c / 2 \operatorname{sen} \eta / \eta & \cos \eta + \pi L_n \operatorname{sen} \eta / \eta \end{pmatrix}, i = 1, 2 \quad (5)$$

$\sqrt{(\pi L_n)^2 + (\delta_c/2)^2}$ , donde  $L/L_b$  es la razón entre la longitud ( $L_f$ ) y la longitud de repetición de la fibra ( $L_b$ );  $2(1 - n)\tau$  es la birrefringencia circular,  $n$  es el índice de refracción y  $\tau$  es la torsión de la fibra. La longitud de repetición indica la longitud de fibra sin retorcer en que los modos linealmente polarizados ganan un corrimiento de fase de  $2\pi$  [7]. Finalmente la matriz de la placa retardadora de un cuarto de onda QWPI está dada por (6).



$$QWP_i = \begin{pmatrix} \exp(i\pi/4) & 0 \\ 0 & \exp(-i\pi/4) \end{pmatrix}, i = 1, 2 \quad (6)$$

Por otra parte, la ecuación que describe el comportamiento del interferómetro en términos de los campos de entrada y salida y que nos permite analizar la dependencia que tiene el haz transmitido, -haz de salida por el puerto 2-, con la torsión de la placa está dada por [2].

$$\begin{pmatrix} E_{2x} \\ E_{2y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (2\alpha - 1)J_{xx} & (1 - \alpha)J_{xy} + \alpha J_{yx} \\ -\alpha J_{xy} - (1 - \alpha)J_{yx} & (1 - 2\alpha)J_{xx} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$E_1$  y  $E_2$  son los campos de entrada y de salida respectivamente,  $\alpha$  es el coeficiente de acoplamiento del acoplador y  $J$  es la matriz de Jones que puede ser calculada como el producto de las matrices correspondientes a cada elemento que forma el lazo del interferómetro como se aprecia en la figura 2.

$$J = B_{r1} \cdot E_{j1} \cdot R_{o1} \cdot QWP1 \cdot R_{o2}^{-1} \cdot LF \cdot R_{o3} \cdot QWP2 \cdot R_{o4}^{-1} \cdot E_{j2} \cdot B_{r2} \quad (8)$$

### 3. Simulaciones numéricas

Numéricamente mostramos la dependencia que tiene el haz transmitido con respecto al grado de rotación de las placas retardadoras QWPi. Para esto primero se coloca la placa QWP2 a un ángulo fijo, matriz (4) donde  $\beta_i = \beta_3 = \beta_4$  en (6) y se hace rotar QWP1  $\beta_i = \beta_1 = \beta_2$ .

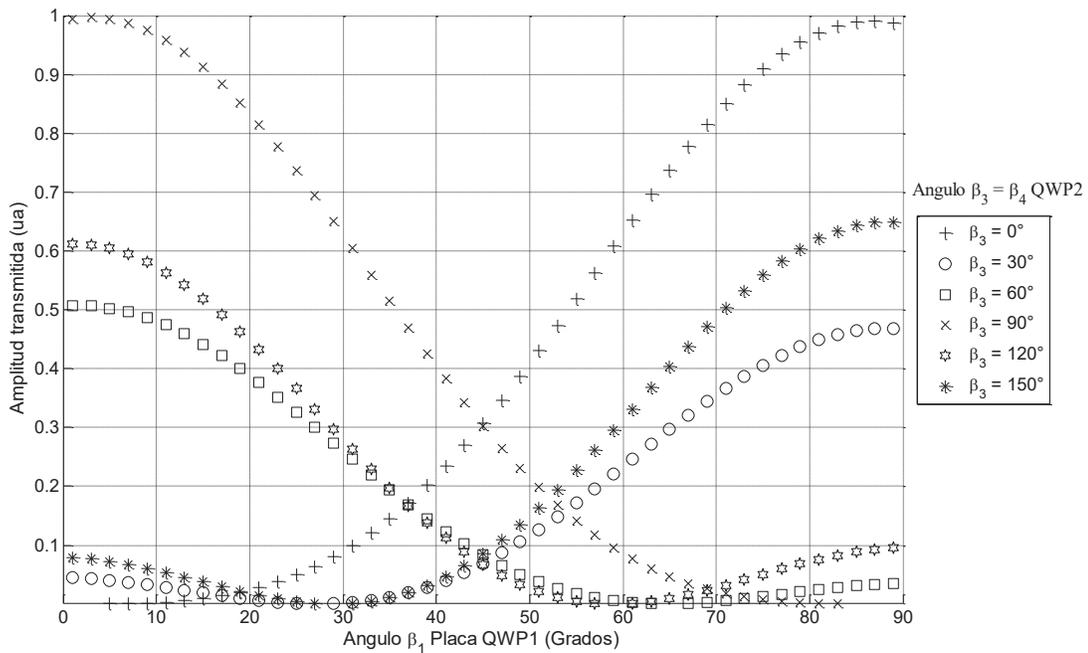
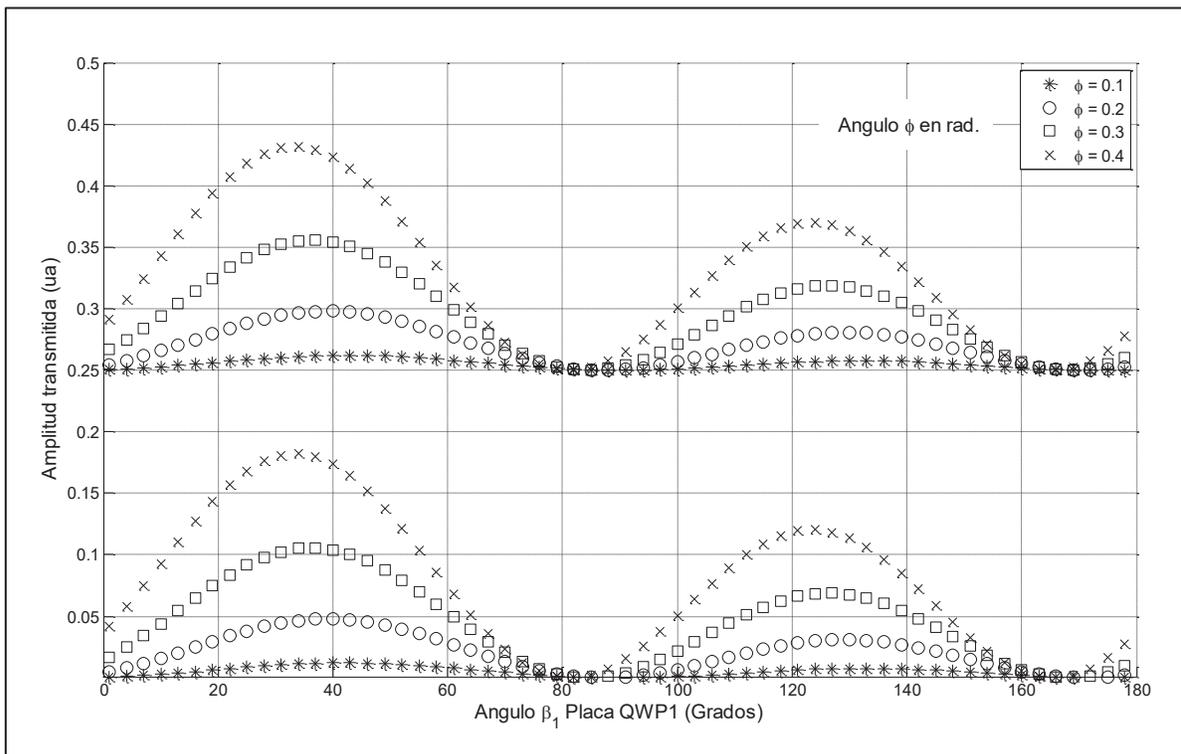


Figura 3. Comportamiento de la Amplitud de salida con respecto a la torsión de QWP1 para distintos ángulos QWP2.



La figura 3 muestra el comportamiento del haz transmitido por el puerto 2 con respecto al ángulo de rotación  $\beta_1$  de la placa QWP1. En este caso se tomaron características idénticas en los brazos del interferómetro, tanto en longitud de estos como el grado de torsión y birrefringencia presentes en los mismos. Puede observarse que se obtiene una amplitud máxima cuando  $\beta_3$  llega a un ángulo de 0 ó 90 grados. Y a medida que el ángulo de QWP2 toma valores intermedios, la amplitud decae a valores que pueden llegar a ser menores que el 50% de la máxima amplitud que se puede obtener. Se observa también que existe un intervalo de 20 a 50 grados en los que la amplitud marcada con “x” decae de manera lineal. De igual manera en el caso de la amplitud marcada con “+” en el intervalo de 40 a 70 grados. Un comportamiento idéntico se obtiene si ahora se deja fija la placa QWP1 y se rota QWP2.

Esta característica del comportamiento de haz transmitido resulta interesante pues experimentalmente podemos determinar la amplitud de salida y por lo tanto la posición angular de cualquiera de las dos placas, o por el contrario, si queremos una amplitud de salida, digamos de 0.7 u.a., debemos colocar QWP1  $\approx 62$  grados y QWP2 = 90 grados ó QWP1  $\approx 28$  grados y QWP2 = 0 grados. Podemos entonces decir que con ambas placas podemos controlar simultáneamente la amplitud de salida, esto es, por dar un ejemplo, si rotando una placa a partir de que tenemos 0.4 u. a. llegamos a un valor de 0.5 u. a., con la placa contraria podemos, idealmente, regresar exactamente la amplitud a su valor original, rotando la segunda placa en dirección contraria, siempre y cuando se tengan las mismas características en los brazos  $Br_1$  y  $Br_2$ . La figura 4 muestra como al girar ambas placas en direcciones contrarias a la misma velocidad se puede mantener la amplitud transmitida sin cambios, en este caso se simularon dos niveles de salida uno en 0 u. a. y otro en 0.25 u. a. (grafica superior).



**Figura 4. Amplitud transmitida contra ángulo de rotación de ambas placas tomando una diferencia de  $\phi$  rad.**

En ambas graficas se considera una diferencia de  $\phi$  radianes como ángulo inicial de rotación entre las dos Placas, además de considerar que se rotan en direcciones contrarias con la misma velocidad. Esto es; colocamos ambas placas en 0 grados con respecto a los ejes de laboratorio pero

además a una de ellas le agrega un ángulo inicial  $\phi$  ( $\beta_1 + \phi$ ). En la figura se observa como al ir disminuyendo  $\phi$  de 0.4 a 0.1 rad la amplitud de salida se vuelve casi invariante, si  $\phi = 0$ , la amplitud permanece constante. Esto parece muy atractivo para sistemas de control de estabilidad ya que el interferómetro de Sagnac de fibra tiene una alta sensibilidad a cambios producidos en el lazo.

#### 4. Arreglo experimental

La figura 5 muestra el arreglo experimental propuesto. El interferómetro de fibra está formado por un acoplador 50/50, el lazo se formó con 5 metros de fibra estándar con una razón de torsión de 5 vueltas por metro.

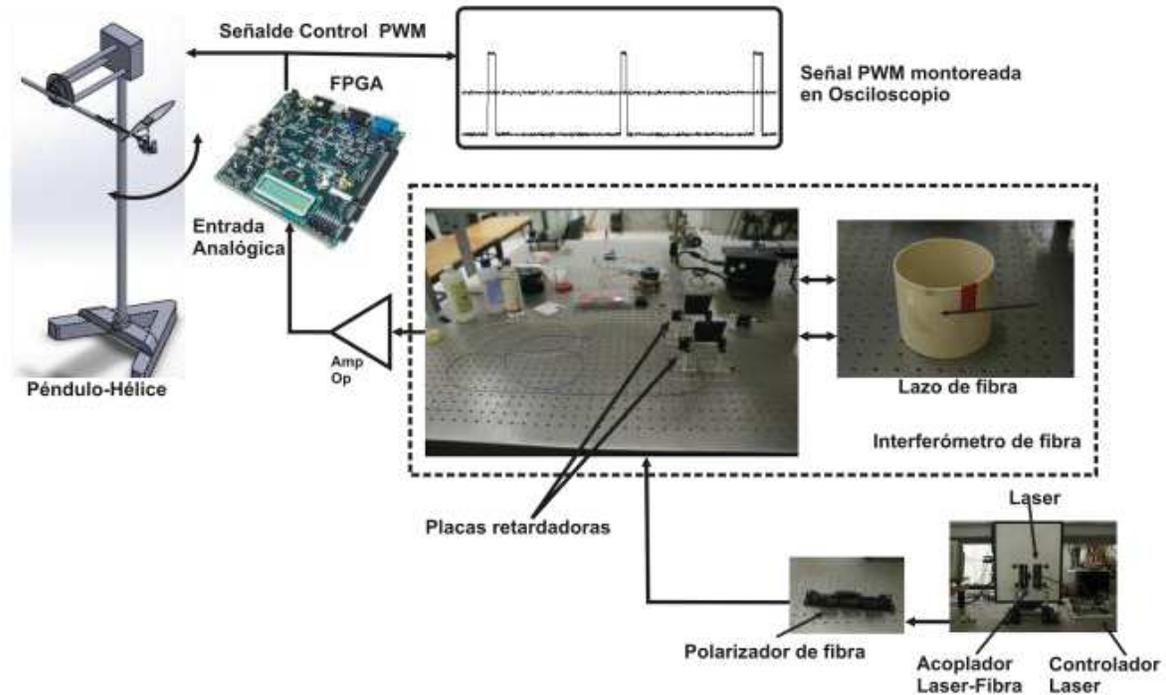


Figura 5. Arreglo experimental

A la entrada del interferómetro empleamos un láser a 980 nm acoplado a la fibra óptica, para tener un haz de luz polarizado circularmente se empleó un polarizador para fibra. Esto con el fin de poder obtener un mejor control de la polarización de los haces de luz que se contra-propagan en el lazo. La salida del interferómetro se conecta a un foto detector DET01CFC de InGaAs conectado a un amplificador operacional de acoplamiento cuya salida va conectada a la entrada analógica de la tarjeta FPGA Spartan 3E, en la que se programó un convertidor analógico digital mediante una máquina de estados y un módulo PWM que controla la velocidad del motor del sistema péndulo-hélice. La señal PWM se monitorea en un osciloscopio digital.

La tarjeta Spartan 3E cuenta con una interfaz periférica serial (SPI) con dos canales de captura analógica que constan de un circuito preamplificador programable y un convertidor ADC. El circuito de captura analógica convierte el voltaje de entrada, en nuestro caso del canal 1, que se localiza en el jumper J7 de la tarjeta, en una representación de 14 bits en complemento a dos [13]. La figura 6a muestra la implementación del hardware de alto nivel (top\_nivel) con los módulos que se programaron en la tarjeta FPGA y sus interconexiones, puede observarse que del módulo de conversión analógica (Conv\_Analog\_Di) se toma la salida DatoPWM(13:0) de 14 bits para llevarlos a la entrada del módulo



PWM. Este módulo se programó haciendo uso de la máquina de estados finitos que se muestra en la figura 6b. En el estado “Inicio” se inicializan las señales tanto del amplificador programable como del convertidor (AMP\_CS, SPI\_SCK, SPI\_MOSI y AD\_CONV). En el estado “Ganancia” se implementa una rutina que manda una palabra de 8 bits formada por dos nibbles de 4 bits para configurar la ganancia del amplificador esto a través de SPI\_MOSI de la tarjeta. En el estado “Conversión” se lee bit a bit el resultado de la representación digital de ambos canales analógicos mismos que son separados en el estado “Salida” en forma de dos palabras de 14 bits, tomamos únicamente los bits de la palabra de canal 1 para ser enviados al módulo PWM. En este módulo se implementa una rutina de conversión, de tal forma que a cada palabra de 14 bits corresponde un ancho de pulso. La razón de emplear la tarjeta Spartan 3E es porque a futuro se tiene pensado agregar más módulos al sistema como el LCD que viene incorporado en la tarjeta o uno externo para monitorear los resultados, más sin embargo, se puede utilizar cualquier otra tarjeta que permita procesar señales.

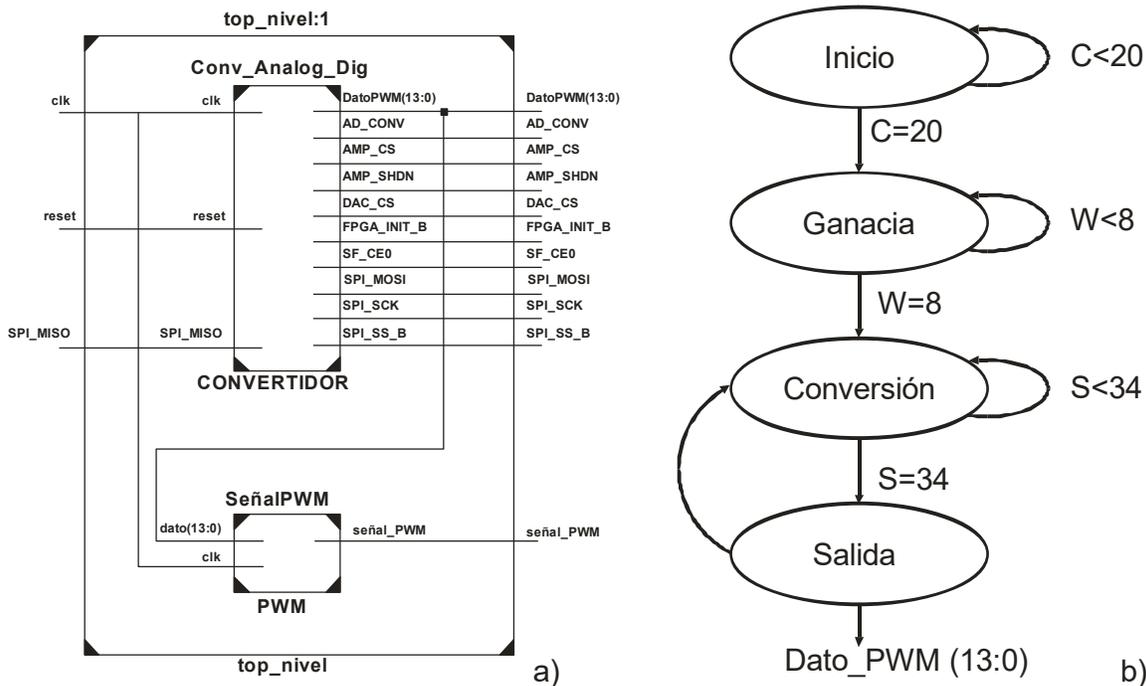


Figura 6. Módulos implementados en la FPGA y máquina de estados empleada en la conversión analógica a digital.

## 5. Análisis de resultados

La figura 7 muestra una comparación de entre los resultados experimentales y los obtenidos en las simulaciones descritas anteriormente en el apartado 3. Se puede observar la variación de la amplitud de salida del interferómetro dependiente de la rotación de una de las placas retardadoras. La línea en color claro es la gráfica experimental obtenida directamente del osciloscopio y corresponde a la imagen mostrada en la parte superior derecha. Para superponer ambas graficas se tuvo especial cuidado en el ángulo de rotación inicial de la placa retardadora con el fin de que ambas coincidieran y rotaran la misma cantidad de grados. En este caso se dejó fija una placa en aproximadamente  $120^\circ$  y se roto la otra un total de  $180$  grados. Se puede observar una gran similitud entre los resultados teóricos y los resultados experimentales. Cabe mencionar que la rotación de la placa retardadora se hizo de manera manual por lo que presenta un aspecto no uniforme.

La figura 8 muestra los cambios que se producen en el ancho de la señal PWM debido al cambio de amplitud del haz de salida del interferómetro producido por la rotación de una de las placas, en este caso QWP1. QWP2 permanece fija.

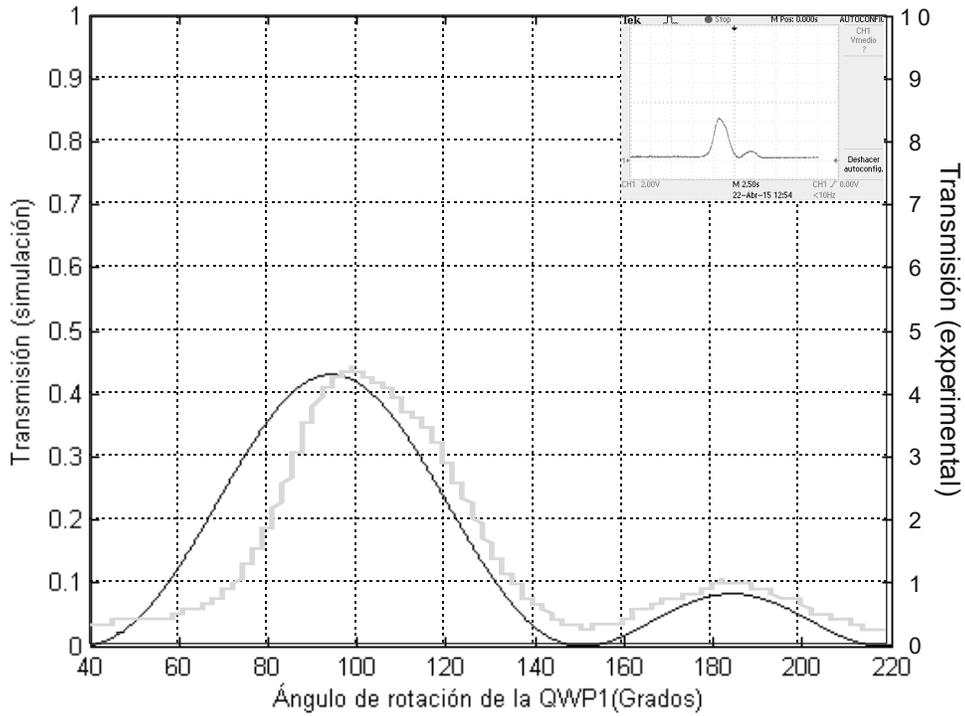


Figura 7. Variaciones de amplitud dependientes de la rotación de una placa retardadora, en color claro resultados experimentales y en negro resultados teóricos.

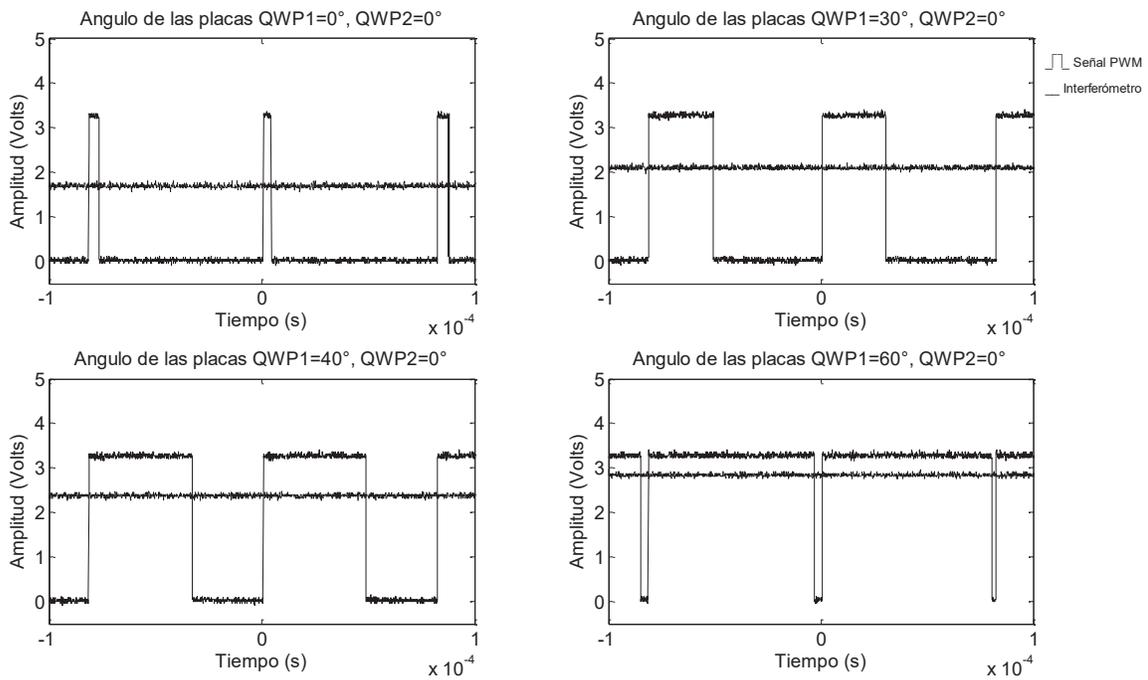


Figura 8. Señal de salida PWM dependiente del ángulo de rotación de QWP1.



En la figura, ambas placas se colocaron primero a un ángulo inicial de  $0^\circ$  con respecto a los ejes de laboratorio, a esta posición se tiene una amplitud, a la salida del interferómetro, de aproximadamente 1.7 volts que nos produce un ancho de pulso de  $4.7 \mu\text{s}$  para una frecuencia PWM de 12.4 KHz. Esta frecuencia se programa en el FPGA y puede adecuarse según las características del motor a controlar. Únicamente cambia el ancho de pulso PWM dependiendo de la amplitud de la señal (salida del interferómetro) que entra al convertidor analógico-digital del FPGA.

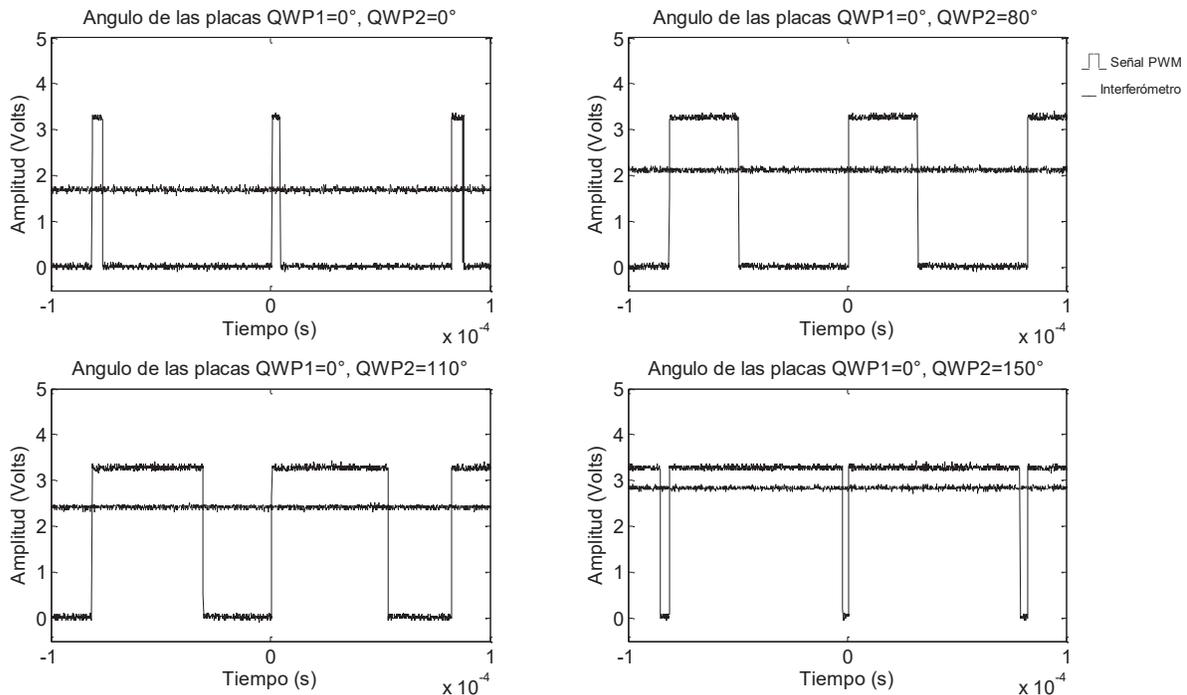


Figura 9. Señal de salida PWM dependiendo el ángulo de QWP2

Se observa claramente cómo va aumentando el ancho del pulso a medida que varía la amplitud de salida del interferómetro para cada ángulo que rota la placa QWP2. En la figura 8 podemos ver que para amplitudes de entrada de aprox. 2.1, 2.4 y 2.9 volts y ángulos de QWP2 de  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  y  $60^\circ$  tenemos un ancho de pulso de 30.5, 48.5 y  $79.7 \mu\text{s}$  respectivamente. Por otra parte, la figura 9 muestra el efecto contrario, ahora de deja fija QWP1 y se rota QWP2, se observa un comportamiento bastante idéntico al anterior, se tienen amplitudes de 1.7, 2.12, 2.4 y 2.8 volts para ángulos de QWP2 de  $0^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $110^\circ$  y  $150^\circ$  respectivamente y con su correspondiente ancho de pulso de 4.7, 31.6, 50.6 y  $79.2 \mu\text{s}$ . En este caso, para alcanzar el mayor ancho de pulso se tiene un mayor recorrido angular de  $0^\circ$  a  $150^\circ$ , que en el caso anterior fue de  $0^\circ$  a  $60^\circ$ . Esto era de esperarse pues es muy difícil tener condiciones idénticas en los brazos del interferómetro, que de ser así, tendríamos exactamente los mismos resultados rotando las placas retardadoras como lo hicimos anteriormente.

## 6. Conclusiones

Presentamos un sistema basado en el interferómetro de Sagnac de fibra óptica con dos placas retardadoras de un cuarto de onda, para controlar la posición angular de un péndulo-Hélice. El sistema basa su funcionamiento en los cambios que se producen en la señal de salida debido a la rotación de las placas retardadoras. Experimentalmente observamos una alta sensibilidad en el lazo del interferómetro y una rápida respuesta a los cambios producidos al rotar las placas retardadoras.



Observamos además, que teniendo las mismas condiciones en los brazos del lazo del interferómetro se puede obtener una operación ideal, esto es, se puede obtener el mismo ancho de pulso rotando cualquier placa el mismo ángulo. Podemos configurar el arreglo de tal manera que el péndulo-hélice se desplace la misma cantidad de grados que la placa retardadora, ajustando tanto las características de los brazos del interferómetro como la frecuencia de la señal PWM. Esto es de interés ya que si acoplamos la placa retardadora al eje de giro del péndulo podemos determinar, midiendo la amplitud de salida, el desplazamiento angular del mismo. Otra característica interesante que muestra este sistema es que si logramos tener las mismas condiciones en los brazos del interferómetro (longitud de fibra, torsión, birrefringencia), podemos mantener sin cambios la amplitud de salida aun cuando las placas retardadoras estén rotando pero con la condición de que roten a la misma velocidad y en direcciones contrarias. Pensamos que si logramos esto último y acoplando las placas retardadoras a un sistema de control retroalimentado podemos lograr con este diseño un sistema con gran estabilidad debido a la alta sensibilidad del interferómetro. Por otro lado, si suspendemos en el aire parte de la fibra que forma los brazos del interferómetro, observamos que se producen variaciones de amplitud debido a pequeños movimientos que siente la fibra, por lo que es necesario, mantenerla fija.

## Referencias

- [1] Bergh R. A., Lefevre H. C. and Shaw H. J. "All single mode fiber optic gyroscope", *Optics Letters*. Vol. 6, 4, 198-200, 1981.
- [2] Mortimore D. B. "Fiber loop reflectors", *Journal of Lightwave Technology*. Vol. 6, 1217-1224, 1988.
- [3] Li-Yang Shao , Xinpu Zhang , Haijun He, Zhiyong Zhang, Xihua Zou, Bin Luo, Wei Pan and Lianshan Yan. "Optical Fiber Temperature and Torsion Sensor Based on Lyot-Sagnac", *Sensors*, Vol. 16, 1774, 2016.
- [4] Kok-Sing L., Iman A., Wu-Yi Ch., Yew-Ken Ch., Sulaiman W. H. and Harith A. "Integrated Microfibre Device for Refractive Index and Temperature Sensing", *Sensors*, Vol. 12, 11782-11789, 2012.
- [5] Lutang W., Nian F., Chunxu W., Haijuan Q. and Zhaoming H. "A Fiber Optic PD Sensor Using a Balanced Sagnac Interferometer and an EDFA-Based DOP Tunable Fiber Ring Laser", *Sensors*, Vol. 14, 8398-8422, 2014.
- [6] Kurzych A., Jaroszewicz L. R., Krajewski Z., Teisseyre K. P. and Kowalski J. K., "Fibre Optic System for Monitoring Rotational Seismic Phenomena", Vol. 14, 5459, 2014.
- [7] Shi J., Wang Y., Xu D., He Y., Jiang J., Xu W., Zhang H., Su G., Yan Ch., Yan D., Lu Y. and Yao J. "Remote Gas Pressure Sensor Based on Fiber Ring Laser Embedded With Fabry-Pérot Interferometer and Sagnac Loop", *IEEE Photonics Journal*. Vol. 8, No. 5, 2016.
- [8] Kuzin E. A., Korneev N., Haus J. W., and Ibarra B. "Theory of nonlinear loop mirrors with twisted low-birefringence fiber", *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 18, 919-925, 2001.
- [9] Pottiez O., Kuzin E. A., Ibarra B. and Mendez F. "Easily tuneable nonlinear optical loop mirror including low-birefringence, highly twisted fibre with invariant output polarisation", *Opt. Commun.* Vol. 229, 147-159, 2004.
- [10] Pottiez O., Kuzin E. A., Ibarra B., Camas J. T. and Gutiérrez F. "Experimental demonstration of NOLM switching based on nonlinear polarisation rotation", *Electron. Lett.* Vol. 40, 892-894, 2004.
- [11] Pottiez O., Kuzin E. A., Ibarra B., Camas J. T. and Gutiérrez F. "Easily tunable nonlinear optical loop mirror based on polarization asymmetry", *Optic Express*, Vol. 12, 3878-3887, 2004.
- [12] McIntyre P., Snyder A. W., "Light propagation in twisted anisotropic media: application to photoreceptors", *J. Opt. Soc. Am.* Vol. 68, 2, 149-157, 1978.
- [13] Xilinx, "MicroBlaze Development Kit Spartan-3E 1600E Edition User Guide", UG257 (v1.1) December 5, 2007.



# Implementación y control de un robot autobalanceado

Guerrero Hernández Jesús Emmanuel, Charre Ibarra Saida Miriam, Murgan Ibáñez Jorge, Gudiño Lau Jorge, Janeth Aurelia Alcalá Rodríguez

Universidad de Colima  
Facultad de Ingeniería Electromecánica  
Manzanillo, Colima, C.P. 28860

## Resumen

*En el presente trabajo se describe el diseño y desarrollo del prototipo de un robot autobalanceado. El robot es capaz de seguir una trayectoria determinada a través de una aplicación desarrollada en App Inventor, comunicando por medio de bluetooth un smartphone con el microcontrolador Arduino ubicado en la estructura del prototipo.*

*Para lograr la posición de equilibrio se programó un controlador PID en el microcontrolador Arduino; con la finalidad de ubicar la posición del robot se utilizaron un acelerómetro y un giroscopio. Finalmente, en el prototipo se implementaron los circuitos para acondicionar las señales entre los dispositivos de medida, actuación y control.*

*Con la finalidad de analizar las respuestas de los controladores se diseñó una Interfaz gráfica en LabVIEW.*

**Palabras clave:** Robot Balancín o autobalanceado, Robot móvil, Péndulo invertido, controlador PID, Arduino.

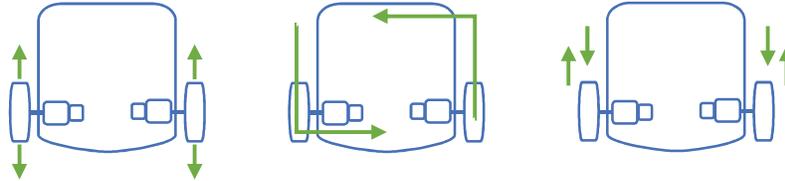
## 1. Introducción

La robótica es un área multidisciplinaria que involucra la mecánica, electrónica y computación; la fabricación de los robots en la actualidad se ha incrementado, y permitirá una expansión de su uso en hogares e industrias. Según sus diferentes capacidades, los robots se clasifican en androides bípedos, zoomórficos, poliarticulados y móviles; éstos últimos poseen la capacidad de desplazamiento mediante plataformas o carros con sistemas de locomoción rodante, por lo general son guiados por telemando o sensores ubicados en su entorno [1].

Los robots que utilizan dos ruedas requieren menos partes, por tanto, su construcción es más sencilla y el control disminuye en complejidad en comparación a robot que utilizan locomoción por patas u orugas.

Los robots Auto-Balanceados de dos ruedas, se refiere a todo robot capaz de equilibrarse en posición vertical sobre sus dos ruedas. Las dos ruedas junto con sus respectivos actuadores, por lo general motores eléctricos, están situadas debajo de la base y permiten que el cuerpo del robot pueda mantener su posición vertical accionando los motores en la dirección de inclinación, ya sea

hacia atrás o hacia delante. Las dos ruedas también proporcionan un sistema de locomoción diferencial, permitiendo que el robot pueda ir recto, girar sobre sí mismo y trazar curvas a través de diversos terrenos y entornos, ver figura 1 [2].



**Figura 1. Trayectoria de un robot balancín de dos ruedas.**

Una de las aplicaciones comerciales más exitosas en los últimos años del robot balancín es el Segway, el cual se muestra en la figura 2.



**Figura 2. Robot Segway.**

El Segway es un vehículo de transporte ligero giroscópico eléctrico de dos ruedas, con autobalance, controlado por ordenador o microcontrolador. Este tiene unas características muy atractivas, puesto que es ecológico, no emite ruido apenas y su conducción es muy intuitiva y por tanto se aprende a usar rápidamente. Además, alcanza velocidades de hasta 20 km/h y tiene una autonomía de alrededor de 40 km [3].

Entre los robots basados en el autobalanceo Hitachi desarrolló un humanoide de dos ruedas llamado EMIEW, el cual ayuda a las personas en sus actividades diarias, tiene sensores para evitar obstáculos, y puede participar en una conversación, ver figura 3 [4].

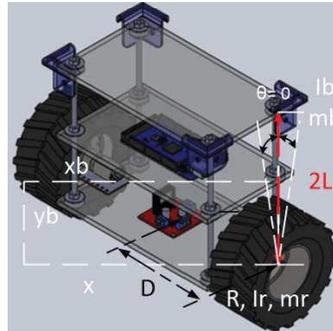


**Figura 3. Robot IO Hawk.**



En este trabajo se implementa y controla un robot autobalanceado, que utiliza el microcontrolador Arduino para mantener la posición vertical y a través de una comunicación vía bluetooth entre el microcontrolador y un smartphone se controla la trayectoria de desplazamiento.

Este sistema se relaciona con una familia de péndulos invertidos, específicamente el denominado control invertido sobre un carro [5]. A continuación se describe el modelo matemático del robot autobalanceado mediante la figura 4.



**Figura 4. Modelo del sistema autobalanceado**

Las ecuaciones dinámicas del sistema, que representan el modelo del robot autobalanceado son [2]:

$$I_b \ddot{\theta} + L m_b g \sin\theta + L m_b \ddot{x} \cos\theta + m_b L^2 \dot{\theta} = \tau_{izq} - \tau_{der} \quad (1)$$

$$\left( m_b + 2m_r + 2 \frac{I_r}{R^2} \right) \ddot{x} - m_b L \dot{\theta}^2 \sin\theta + m_b L \dot{\theta} \cos\theta = \frac{\tau_{izq} + \tau_{der}}{R} \quad (2)$$

$$I_b \dot{\delta} = \frac{\tau_{izq} - \tau_{der}}{R} D \quad (3)$$

Donde:

$\theta$  : Ángulo de inclinación

$x$ : Posición con respecto al centro de las ruedas

$x_b, y_b$ : Posición con respecto al centro de masa

$\delta$ : Velocidad angular de giro (rotación)

$L$ : Distancia del eje de la rueda al centro de masa

$m_b$ : Masa total de la estructura vertical motores y soporte

$I_b \theta, I_b \delta$ : Momento de inercia de la estructura vertical

$D$ : Distancia lateral al centro de la rueda

$R$ : Radio de la rueda

$m_r$ : Masa de la rueda

$I_r$ : Constante de inercia de la rueda



$\tau_{izq}, \tau_{der}$  : Torques en las ruedas (izquierda y derecha)

## 2. Metodología de Funcionamiento

En la figura 5 se presenta la metodología implementada en el prototipo para su equilibrio y movimiento.

En el diagrama de flujo del sistema se observa que primero se activa el prototipo, después se ejecuta la interfaz de control y posición, para tener control sobre el robot se realiza la conexión bluetooth al dispositivo de control, entonces el robot debe determinar si recibió un dato del teléfono, si no recibió algún dato el robot lee a que ángulo está, si el robot está en el ángulo que no sea 0, el PID determina el error y con ello determina la señal que se aplicara en la etapa de potencia, este ciclo se repetirá hasta que el ángulo sea 0, si el ángulo es 0, el robot revisa si recibió algún dato del bluetooth, si el robot recibió algún dato, se determina cual es la acción a hacer, si el robot debe avanzar se aumenta el ángulo deseado, si el robot está en el ángulo que no sea el deseado, el PID determina el error y con ello determina la señal que se aplicara en la etapa de potencia, este ciclo se repetirá hasta que el ángulo sea el deseado.

Si el ángulo es el deseado, el robot revisa si recibió algún dato del bluetooth, si el robot debe retroceder se reduce el ángulo deseado, si el robot está en el ángulo que no sea el deseado, el PID determina el error y con ello determina la señal que se aplicara en la etapa de potencia, este ciclo se repetirá hasta que el ángulo sea el deseado. Si el ángulo es el deseado, el robot revisa si recibió algún dato del bluetooth, si el robot tiene que girar se envía una señal a la etapa de potencia de los motores determinando hacia donde debe de girar.

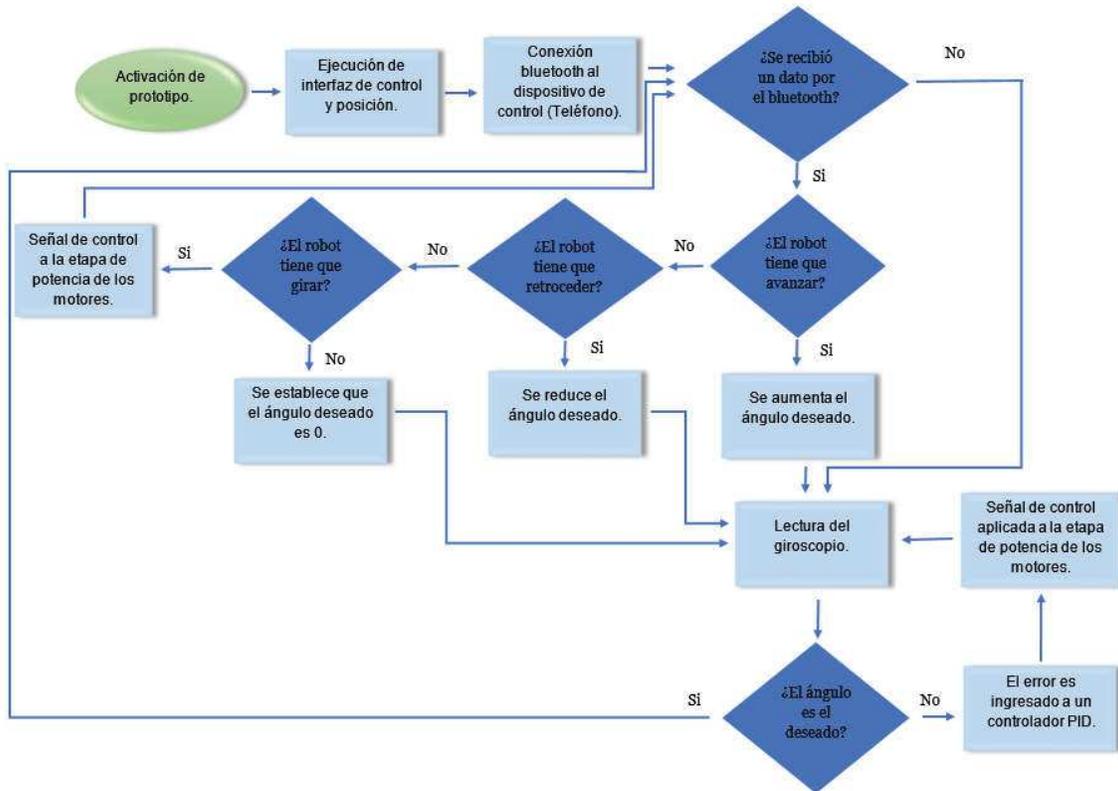
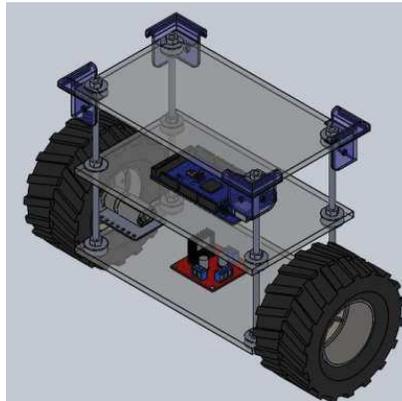


Figura 5. Diagrama de funcionamiento de Robot Autobalanceado.

### 3. Diseño de la estructura

Utilizando el software SolidWorks, se diseñó el prototipo. En la figura 6 se muestra el diseño final del prototipo.



**Figura 6. Diseño final de Prototipo.**

El prototipo del robot equilibrista consiste en una estructura elaborada con acrílico y varilla roscada, se muestra en la figura 7.



**Figura 7. Estructura de Robot Autobalanceado.**

Cuenta con un acelerómetro y un giroscopio para sensar la posición del robot. En la parte inferior y central del robot se encuentran localizados todos los circuitos electrónicos que se utilizaron. La señal de control se aplica a los motores a través de un puente H.



## 4. Componentes Principales

### 4.1 Circuito MPU-6050

El circuito integrado de InvenSense MPU-6050 (figura 8) contiene un acelerómetro y giroscopio MEMS en un solo encapsulado.

Es uno de los sensores más precisos del mercado con sus 16-bits de resolución, lo que significa que divide el rango dinámico en 65536 fracciones (Por ej. con  $\pm 2g$  que equivale a  $4g$  de aceleración se tendría una sensibilidad de  $4g/65536=61\mu g$ ), lo cual aplica para cada eje X, Y y Z al igual que en la velocidad angular.

El sensor es ideal para diseñar control de robótica, medición de vibración, sistemas de medición inercial (IMU), detector de caídas, sensor de distancia y velocidad, entre otras [6].



Figura 8. Sensor mpu6050.

### 4.2 Batería LIPO

La batería de polímero de iones de litio (abreviadamente LiPo) son pilas recargables, compuestas generalmente de varias células secundarias idénticas en paralelo para aumentar la capacidad de la corriente de descarga, y están a menudo disponibles en serie de "packs" para aumentar el voltaje total disponible. Se muestra una batería en la figura 9.



Figura 9. Batería LIPO 12 Volts.

### 4.3 Microcontrolador Arduino.

Es una placa electrónica basada en el ATmega1280. Cuenta con 54 pines digitales de entrada/salida (de los cuales 14 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos serie de hardware), un oscilador de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP, y un botón de reinicio (figura 10) [6].

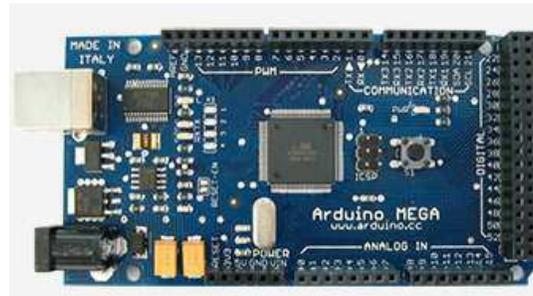


Figura 10. Arduino Mega.

## 5 Descripción del Control

Para posicionar el robot autobalanceado se utiliza un sensor MPU 6050, cuando el sensor detecta variación en el ángulo ideal el cual es el Setpoint, los motores reaccionan moviéndose hacia esa dirección evitando la caída, para lograrlo se implementó un controlador PID que se encarga de determinar la señal PWM aplicada a los motores.

En la figura 11, se muestra el diagrama del circuito del robot donde se utiliza el sensor MPU6050 que indica la posición del robot y que manda la señal al arduino donde un controlador PID manda la señal al puente "H" el cual activa los motores para que se mantenga en una posición vertical. También se observa un módulo bluetooth el cual es utilizado para recibir los datos que envía la aplicación la cual se encarga del movimiento del robot.

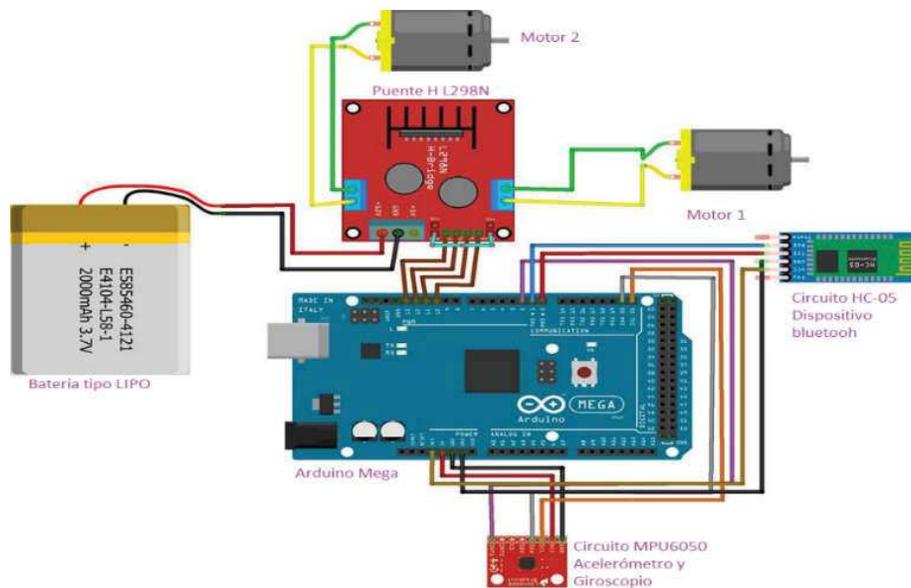


Figura 11. Conexión de los componentes del robot.

El propósito del controlador PID es mantener el sistema en la posición vertical (figura 12).

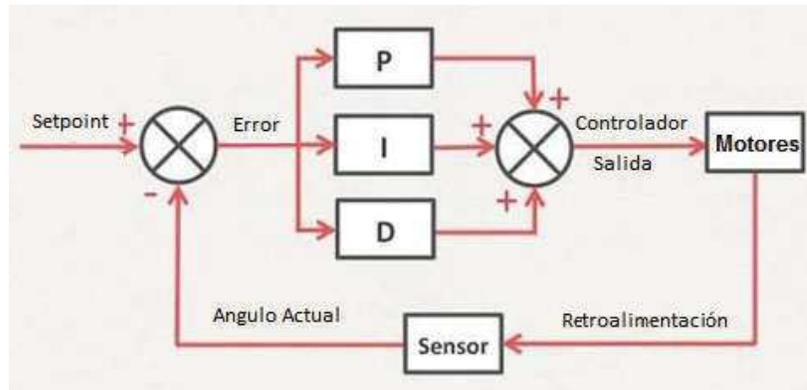


Figura 12. Diagrama de bloques de controlador PID.

El error (respecto al set point) es multiplicado por una constante proporcional P, y enviada a la salida. "Proporcional" significa que el cambio presente en la salida del controlador es algún múltiplo del porcentaje de cambio en la medición.

En la acción integral I, el error es integrado, tiene la función de promediarlo o sumarlo por un periodo de tiempo. Luego es multiplicado por una constante I y se agrega a la salida proporcional. I representa el error de estado estacionario del sistema.

El error se deriva con respecto al tiempo y se multiplica por una constante D y luego se suma a las señales anteriores. La función de la derivativa es gobernar la respuesta de control a los cambios en el sistema ya que una mayor derivativa corresponde a un cambio más rápido y el controlador puede responder acordemente. Así como la respuesta proporcional responde al tamaño del error y el reset responde al tamaño y duración del error, el modo derivativo responde a cuan rápido cambia el error.

A continuación, se muestra el código del programa para el PID, la sintonización de él se realizó por el método heurístico:

```
unsigned long lastTime;
double Input, Output, Setpoint;
double errSum, lastInput;
double kp, ki, kd;
int SampleTime = 1000; // Tiempo de muestreo de 1 segundo.
void Compute() {
    unsigned long now = millis();
    int timeChange = (now - lastTime);
    if(timeChange>=SampleTime) {
        // Calcula todas las variables de errores.
        double error = Setpoint - Input;
        errSum += error;
        double dInput = (Input - lastInput);
        // Calculamos la función de salida del PID.
        Output = kp * error + ki * errSum - kd * dInput;
        // Guardamos el valor de algunas variables para el próximo ciclo de
        cálculo.
        lastInput = Input;
        lastTime = now;
    }
}
void SetTunings(double Kp, double Ki, double Kd)
{
    double SampleTimeInSec = ((double)SampleTime)/1000;
    kp = Kp;
    ki = Ki * SampleTimeInSec;
```



```
kd = Kd / SampleTimeInSec; }
```

Para el desplazamiento del robot se utiliza una aplicación realizada en App Inventor, la interfaz se aprecia en la figura 13.



Figura 13. Aplicación en Android.

## 6 Monitoreo de Señales

Para la demostración de los resultados del robot autobalanceado se programó un instrumento virtual en Labview (figura 14) para graficar el ángulo de inclinación, el ángulo de error y el porcentaje de salida del controlador del robot balanceado.

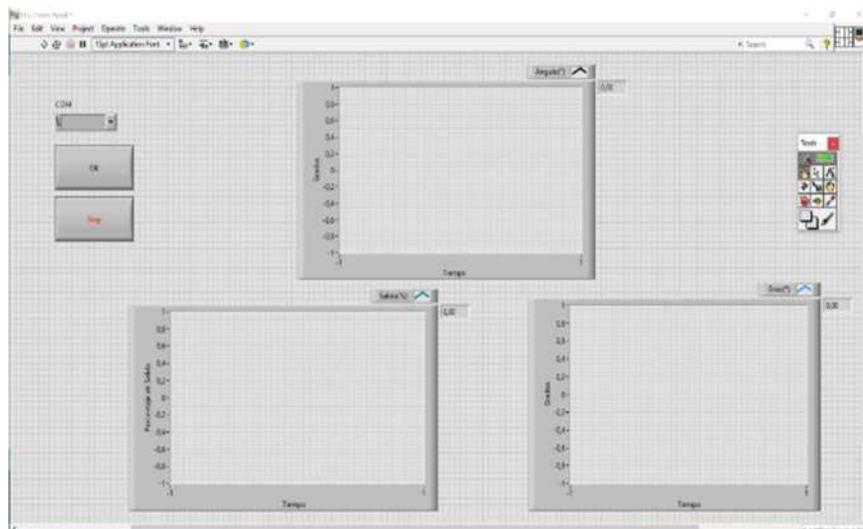


Figura 14. Diseño de Interfaz gráfica.



La figura 15 presenta el diagrama de bloque del programa.

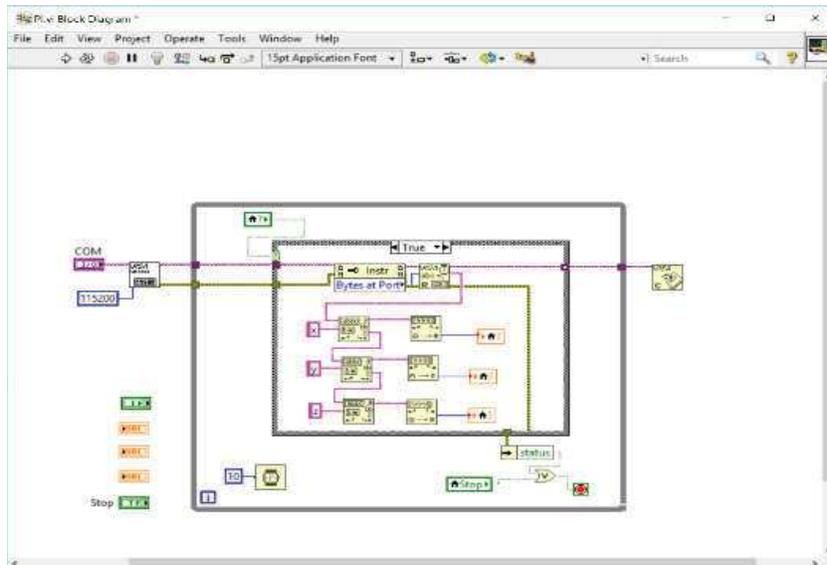


Figura 15. Diagrama de bloques de interfaz gráfica.

## 7 Resultados

La figura 16 presenta las señales del controlador, el ángulo de la posición y el valor del error, cuando el robot se encuentra en la posición de equilibrio ( $0^\circ$ ).

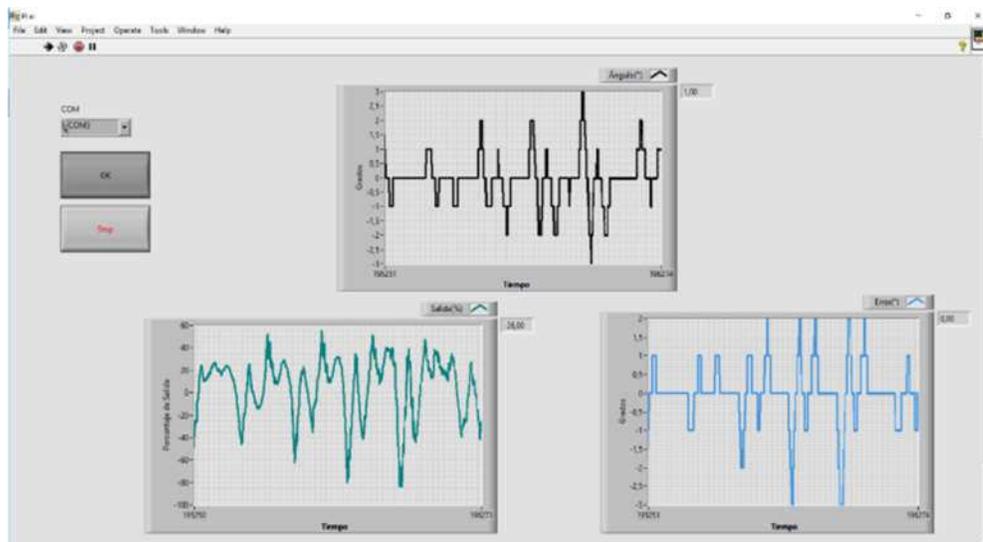


Figura 16. Gráfica del comportamiento del robot.



En la figura 17 se muestra el comportamiento del error después de haber recibido una perturbación, se observa que el error regresa a 0.

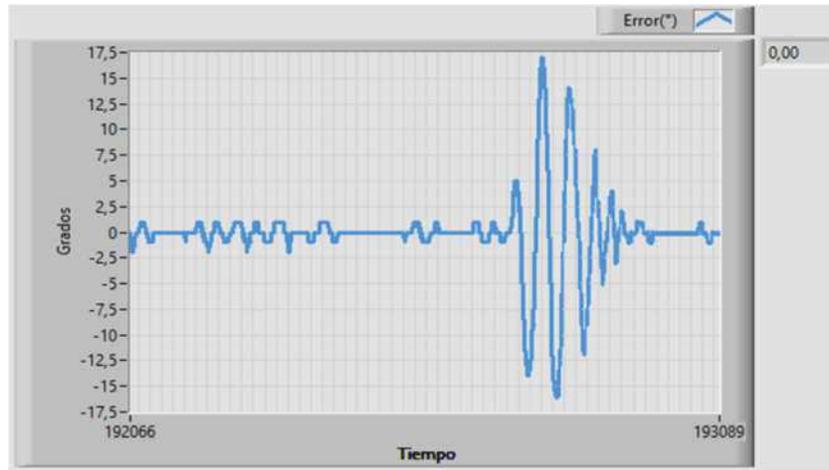


Figura 17. Gráfica del error con perturbación.

En la figura 18 se muestra la gráfica donde se observa el comportamiento de la salida del controlador respecto al tiempo, cuando el robot sufre alguna perturbación. La salida de -100% a 100% equivalente a -5V y 5V respectivamente.

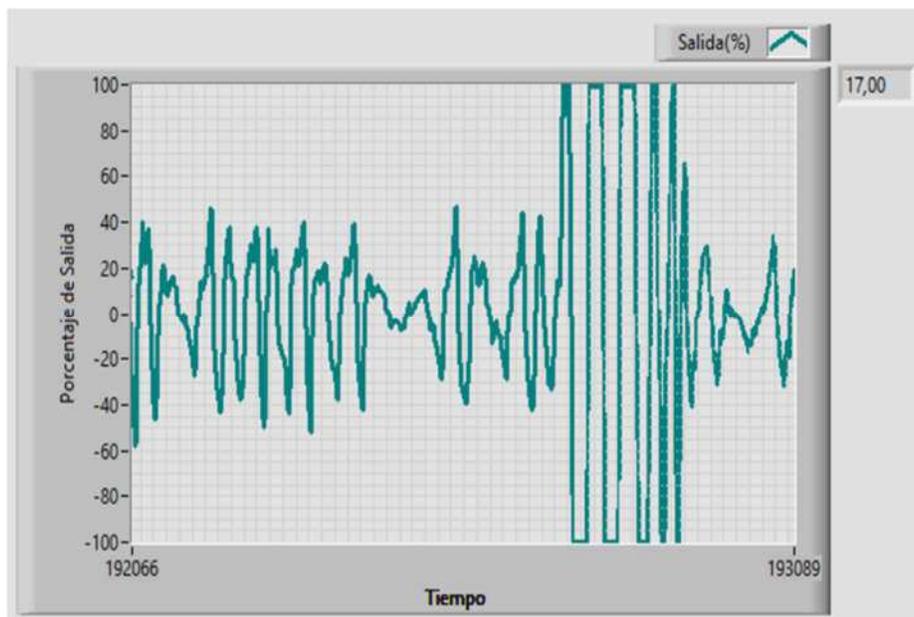


Figura 18. Gráfica de la salida de controlador, con perturbación.



En la figura 19 se observa la posición del robot obtenida por el giroscopio en el momento en el que el prototipo presenta una perturbación.

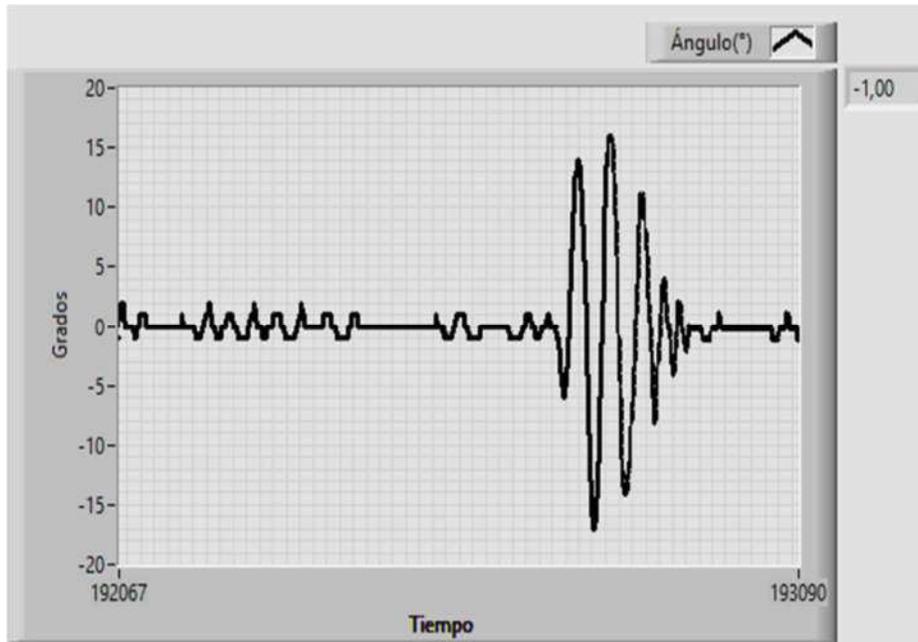


Figura 19. Gráfica de la posición del robot, con perturbación.

En la figura 20 se muestra la gráfica del error del controlador cuando el prototipo se encuentra estable, se puede observar que la gráfica oscila entre  $-2^\circ$  y  $1^\circ$  después de lograr estabilizarse, a diferencia de la figura 17 que oscilaba entre  $-17^\circ$  y  $17.5^\circ$  al recibir la perturbación.

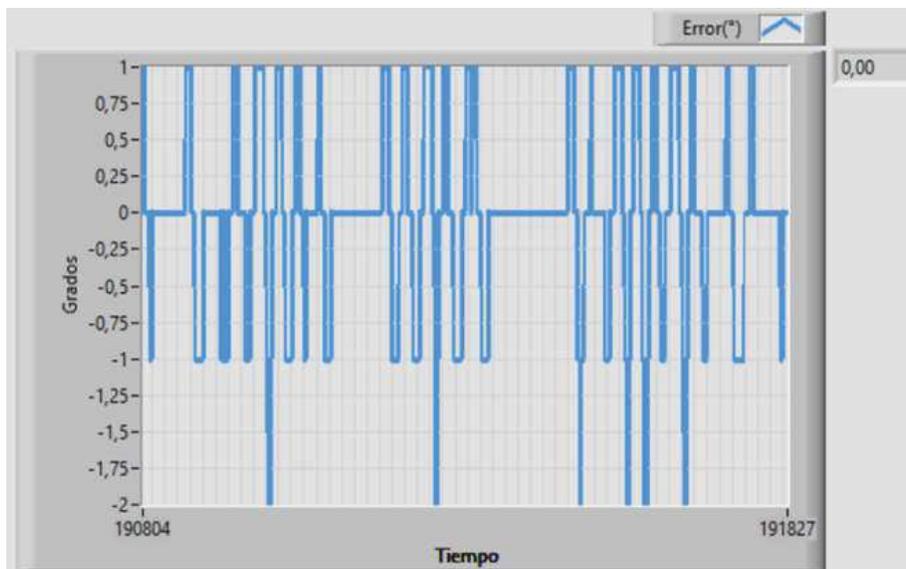


Figura 20. Gráfica de error de controlador, cuando el prototipo se encuentra estable.



En la figura 21 se muestra la salida del controlador cuando el robot se encuentra en una posición de equilibrio, se observa una oscilación entre -60% y 50%, lo equivalente a -3V y 2.5V respectivamente.

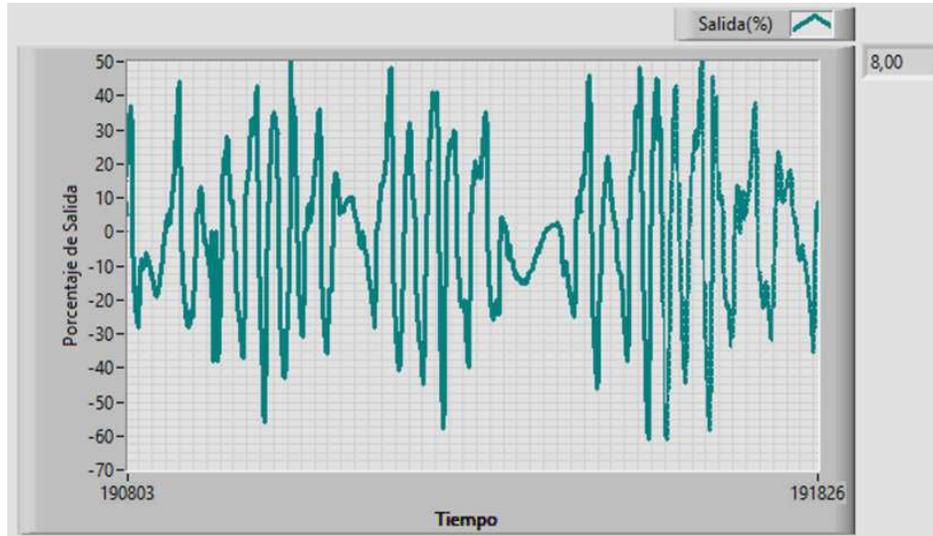


Figura 21. Gráfica de la salida del controlador, cuando el prototipo se encuentra estable.

La figura 22 presenta la gráfica de la posición del robot, cuando el prototipo se encuentra estable. Se observa una oscilación entre  $-2^\circ$  y  $2^\circ$  a diferencia de la oscilación que se observa en la figura 19, donde la oscilación varía entre  $-20^\circ$  y  $15^\circ$ .

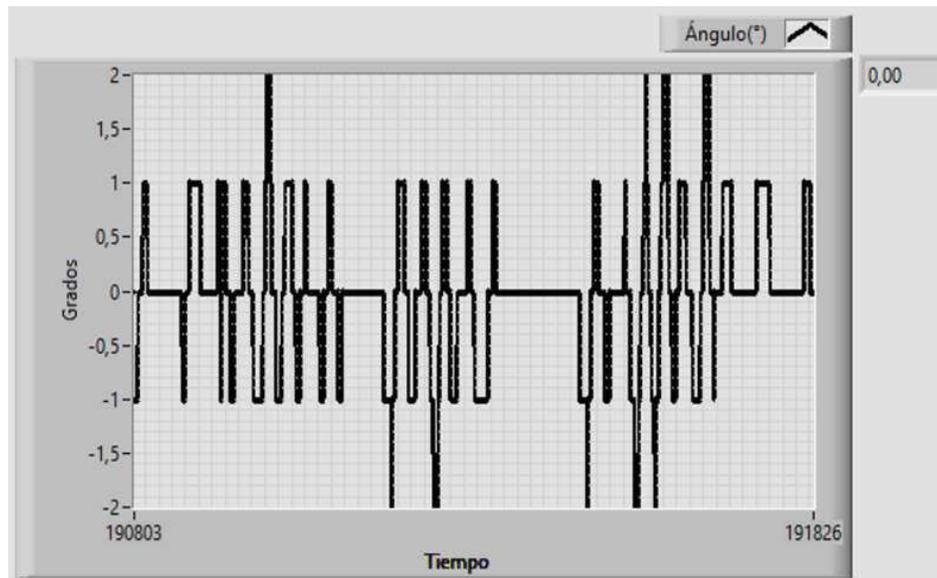


Figura 22. Gráfica de la posición del robot, cuando el prototipo se encuentra estable.



## 8 Conclusiones

El objetivo principal de este proyecto consistió en diseñar y construir un robot autobalanceado que fuese capaz de mantener su equilibrio en posición vertical, las gráficas presentadas en resultados demuestran que el prototipo se mantiene estable, y el controlador es capaz de llevarlo al equilibrio aun recibiendo alguna perturbación. Después de realizar los experimentos se concluye que el robot mantiene su equilibrio y puede ser controlado remotamente a través de comunicación bluetooth.

Como trabajos futuros, al sistema se le podrían aplicar técnicas de control inteligente, como lógica difusa y algoritmos genéticos con la finalidad mejorar su respuesta. En cuanto a la comunicación, ésta se podría incrementar si se considera el uso de la tecnología WiFi.

## Referencias

- [1] Porcuna P. “*Robótica y domótica básica con Arduino*”, Ra-Ma, México, 2016.
- [2] Romero Á., Marín A., Jiménez J. “*Sistema De Monitoreo Y Control Para Un Robot Autobalanceado Sobre Dos Ruedas Modelado En 3d*”. *rev.udcaactual.divulg.cient.*, Bogotá , v. 17, n. 2, p. 541-551, Dec. 2014.
- [3] SEGWAY. Obtenido de: <http://www.segway.com.mx/#!/-bienvenido/>
- [4] EMIEW. Obtenido de : <http://www.roboticstoday.com/robots/emiew>
- [5] Aracil J. y Gordillo F. “*El péndulo invertido: un desafío para el control no lineal*”. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 2 (2), 8-19. (2005).
- [6] Corona L. y Abarca G. *Sensores y actuadores Aplicaciones con Arduino*, Grupo editorial Patria, México Primera edición, 2014.



# Diseño de un sistema para un rehabilitador de hombro

Espinosa-García F.J.<sup>1</sup>, Lagunez-Caramon M. H.<sup>2</sup>, Lugo-González E.<sup>3</sup>, Tapia-Herrera R.<sup>4</sup>, Arias-Montiel M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>División de Posgrado, Universidad Tecnológica de la Mixteca. Huajuapán de León, Oaxaca, México.

<sup>2</sup>Instituto de electrónica y mecatrónica, Universidad Tecnológica de la Mixteca. Huajuapán de León, Oaxaca, México.

<sup>3</sup>CONACyT- Universidad Tecnológica de la Mixteca. Huajuapán de León, Oaxaca, México.

<sup>4</sup>ESIME, Zacatenco. Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México, México.

## Resumen

*Se presenta la síntesis de un mecanismo de 5 barras, el análisis cinemático de un manipulador como base del diseño mecatrónico de un rehabilitador de hombro, la simulación mecánica del prototipo virtual y la simulación del sistema de control de motores. Como objetivo se tiene generar los movimientos requeridos para la rehabilitación del miembro superior. La metodología que se utilizó se basa en obtener los requerimientos de diseño, realizar el análisis y la síntesis del mecanismo para actuar el prototipo y seguir las trayectorias, realizar el análisis cinemático del manipulador y realizar la simulación. Se utilizaron los programas ADAMSView™ y SolidWorks® para verificar el cumplimiento de las trayectorias básicas para una secuencia de actividades en la terapia correspondiente. Como resultados se tiene el diseño de un prototipo mecánico, así como la simulación del prototipo virtual para validar los requerimientos.*

**Palabras clave:** diseño mecatrónico, rehabilitador de hombro, simulación.

## 1. Introducción

Actualmente los exoesqueletos son utilizados por los fisioterapeutas para la rehabilitación física del miembro superior, en [1-4] se presentan algunos trabajos de investigación. Comercialmente se tienen: Kinetec Centura®, InMotion Arm®, Aupa, JACE S603 o Armeo® en sus diferentes modalidades. Lo que estos dispositivos tienen en común es que son diseños basados en manipuladores robóticos y mecanismos que pueden ser activos o pasivos durante la terapia, pueden realizar movimientos repetitivos con precisión por largos periodos, al utilizarlos se pueden reducir los tiempos de rehabilitación, permiten realizar terapias individuales o de grupo con un terapeuta. Como desventaja no pueden igualar la movilidad de los miembros a rehabilitar, algunos son muy grandes y pesados o necesitan muchos actuadores para generar los movimientos requeridos. Para disminuir el número de actuadores o evitar que sean de un par muy grande, en algunos proyectos se utilizan mecanismos como elementos de transmisión y transformación del movimiento [5-7]. Principalmente se utilizan mecanismos de 4 barras. En este proyecto se propone el uso de uno de cinco barras con un tipo de topología variable que aplica como mecanismo de 2 fases. En cada fase, un eslabón adyacente al permanente conecta al eslabón temporalmente con el mecanismo y el resto de los eslabones actúan como un simple mecanismo de cuatro barras [8].

El objetivo de este trabajo es diseñar un prototipo de exoesqueleto auxiliar en las terapias de rehabilitación de miembro superior, que en comparación con los mencionados anteriormente sea más ligero y con un menor número de actuadores sea capaz de ayudar a pacientes con problemas de manguito rotador entre otros. El exoesqueleto tiene 3 GDL (grados de libertad) para realizar los tres movimientos del hombro (flexión, aducción-abducción y rotación interna-externa) en rangos funcionales,



empleando un mecanismo de 5 barras como elemento generador del movimiento. El diseño es validado cinemáticamente con simulaciones numéricas en paquetes computacionales especializados como Matlab® y ADAMSView™, para verificar que los rangos de movimiento cubren las necesidades de las terapias de rehabilitación. También, se realiza el análisis de elemento finito para cuantificar los esfuerzos y las deformaciones en la estructura mecánica del exoesqueleto, validando la selección de materiales para su manufactura.

## 2. Desarrollo

Para el diseño de este proyecto se siguió la metodología del diseño mecatrónico [9], cuyas etapas del desarrollo se explican a continuación.

1. *Reconocimiento de las necesidades:* Se identifica el problema a tratar, en este caso es la rehabilitación del hombro.
2. *Diseño conceptual y especificación funcional:* Se realiza una identificación de los principales movimientos del hombro así como las medidas antropométricas del mexicano promedio.
3. *Principio del modelo matemático:* En esta etapa se analiza matemáticamente el diseño propuesto para determinar su cinemática.
4. *Selección de sensores y actuadores:* Aquí se realiza una identificación de los sensores a utilizar y los motores que mas se adecúan con base a los resultados obtenidos en la etapa anterior.
5. *Simulación del prototipo:* Por medio de paquetes computacionales el diseño es probado para determinar si se cumplen los criterios propuestos del diseño.
6. *Optimización del diseño del prototipo:* En esta etapa se realizan los cambios necesarios si es que el diseño no pudo cumplir con los requerimientos.

Iniciando por la obtención de las necesidades del usuario y del terapeuta, para el uso del prototipo se tienen que generar los movimientos de: flexión - extensión del hombro, aducción - abducción del hombro, de rotación interna - externa del hombro, de flexión - extensión del codo y rutinas predefinidas y variables.

Con base en estos, las restricciones que deben cumplirse para obtener los movimientos del brazo se presentan en la tabla 1:

**Tabla 1 Parámetros funcionales del rehabilitador**

Parámetro	Valor marginal	Valor ideal
Ángulo de flexión del hombro (grados).	90	180
Ángulo de extensión del hombro (grados.)	23-25	45-50
Ángulo de aducción del hombro (grados).	30-23	30-45
Ángulo de abducción del hombro (grados)	90	180
Ángulo de rotación interna del hombro (grados).	15	30
Ángulo de rotación externa del hombro (grados).	40	80
Tiempo de programación de la rutina en ángulos de movimiento (seg)	180	120
Tiempo para colocar el exoesqueleto (seg)	300	180
Edad de pacientes (años)	>40	>20
Peso máximo soportado por el paciente (kg)	5	5
Tiempo de ensamble/desensamble para mantenimiento (seg)	3600	1800
Rehabilitación de hombro	Derecho o izquierdo	Derecho e izquierdo



## 2.1 Diseño conceptual

Para diseñar los componentes del mecanismo se necesita considerar las medidas promedio del cuerpo humano; en este caso, se emplean las medidas antropométricas del miembro superior que presenta una persona adulta promedio. En los trabajos [4, 10] se midieron un total de 8,228 sujetos con un rango de edad de 2 a 85 años, el muestreo fue por conveniencia, la definición de las dimensiones y el método para medir se basó en la "Técnica Antropométrica estandarizada", dichos estudios muestran medidas antropométricas de los estados de Guadalajara, ciudad de México, Guanajuato y la zona fronteriza México-EUA, para rangos de población de 18 a 68 años.

En la figura 1 se muestra el modelo cinemático del miembro superior y en la tabla 2 las medidas antropométricas promedio del cuerpo humano.

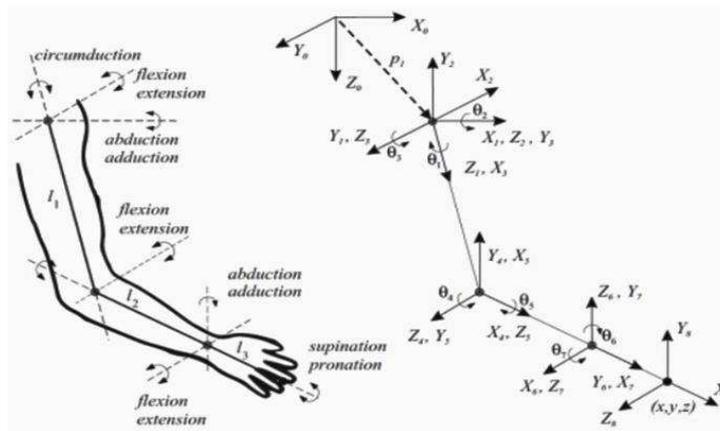


Figura 1. Notación D-H para el miembro superior [10].

Tabla 2. Resumen de medidas antropométricas de la población mexicana , ambos sexos [12].

Dimensiones	Máximo	Mínimo	Rango
Peso (kg)	40.5	97.3	56.8
Estatura (cm)	139.8	181.3	41.5
Altura al hombro (cm)	113.8	149.2	35.4
Altura sentado (cm)	70	111.2	41.2
Distancia del hombro al mentón (cm)	9.9	20.7	10.8
Longitud de brazo (cm)	24.3	55.67	31.37
Longitud codo-codo flexionado (cm)	2.93	11.8	8.87
Longitud de antebrazo (cm)	19.63	42.5	22.87
Longitud de la mano (cm)	8.7	28.2	19.5
Longitud palma mano (cm)	7.67	11.3	3.63
Diámetro máx. bideltoideo (cm)	36.1	54.4	18.3
Anchura máxima cuerpo (cm)	39.10	59.60	20.50
Diámetro transversal tórax (cm)	24.5	39.8	15.30
Diámetro bitrocantérico (cm)	25.6	40.7	15.1
Anchura codos (cm)	36.7	62.0	25.3
Anchura de la mano (cm)	8.0	24.25	16.25
Perímetro del brazo (cm)	20.3	35.2	14.9
Anchura de la palma mano (cm)	6.7	9.4	2.7
Diámetro empuñadura (cm)	2.87	14.55	11.68

Las especificaciones funcionales son las siguientes:



Ajustar la altura al hombro.  
 Ajustar la longitud del brazo.  
 Ajustar el perímetro del brazo.  
 Mecanismo para brazo derecho-izquierdo.

Para el análisis de movimiento, se realiza el diagrama del mecanismo de cadena cerrada que genera las trayectorias deseadas, éste se presenta en la figura 3 con base en la figura 2.



Figura 2. Diseño de mecanismos del prototipo

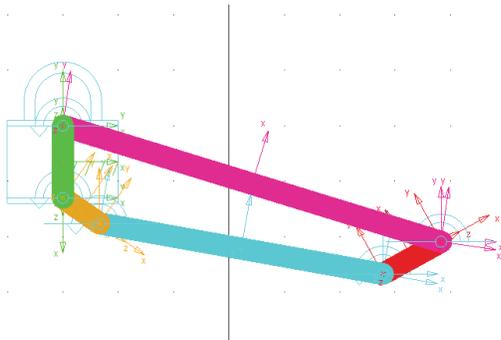


Figura 3. Diagrama de la cadena cerrada del mecanismo

Para resolver la cinemática del mecanismo se utilizó la metodología planteada en [8]:

$$r_2 + r_3 + r_4 - r_5 - r_1 = 0 \quad (1)$$

$$P = r_2 + r_3 \quad (2)$$

Donde:

$r_1, r_2, r_3, r_4$  y  $r_5$  son las longitudes de los eslabones del mecanismo de la figura 3.

La ecuación 1 se puede escribir en dos componentes:

$$r_2 \cos \theta_2 + r_3 \cos \theta_3 - r_5 \cos \theta_5 - r_1 = -r_4 \cos \theta_4 \quad (3)$$

$$r_2 \sin \theta_2 + r_3 \sin \theta_3 - r_5 \sin \theta_5 = -r_4 \sin \theta_4 \quad (4)$$

Elevando al cuadrado y sumando las ecuaciones (3) y (4) se obtiene:

$$\theta_3 = 2 \operatorname{atan} \left( \frac{-B \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{C - A} \right) \quad (5)$$



Donde :

$$A = 2r_3(-r_1 + r_2 \cos\theta_2 - r_5 \cos\theta_5), B = 2r_3(r_2 \sin\theta_2 - r_5 \cos\theta_5) \text{ y } C = r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_4^2 + r_5^2 - 2r_2r_5 \cos(\theta_2 - \theta_5) - 2r_1r_2 \cos\theta_2 + 2r_1r_5 \cos\theta_5.$$

Resolviendo para  $\theta_4$  las ecuaciones (3) y (4) se obtiene:

$$\theta_4 = 2 \operatorname{atan}\left(\frac{-D \pm \sqrt{E^2 + D^2 - F^2}}{F - E}\right) \quad (6)$$

Donde:

$$D = 2r_4(-r_1 + r_2 \cos\theta_2 - r_5 \cos\theta_5), E = 2r_4(r_2 \sin\theta_2 - r_5 \cos\theta_5) \text{ y } F = r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_4^2 + r_5^2 - 2r_2r_5 \cos(\theta_2 - \theta_5) - 2r_1r_2 \cos\theta_2 + 2r_1r_5 \cos\theta_5.$$

Los parámetros de Denavit-Hartenberg del brazo considerando como manipulador se muestran en la tabla 3:

**Tabla 3. Parámetros DH**

Articulación	$\theta$	D	a	A
1	$\theta_1 + 90$	0	0	90
2	$\theta_2 + 90$	0	0	-90
3	$\theta_3$	0	0	0
4	$\theta_4$	0	0	0

Para obtener los valores de posición se tiene:

$$= \begin{pmatrix} \cos\theta_n & -\cos\alpha_n \sin\theta_n & \sin\alpha_n & a_n \cos\theta_n \\ \sin\theta_n & \cos\alpha_n \cos\theta_n & -\sin\alpha_n \cos\theta_n & a_n \sin\theta_n \\ 0 & \sin\alpha_n & \cos\alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Al substituir en la matriz general, desde el eslabón 1 hasta el efector final:

$$T_4^0 = \begin{bmatrix} p_1 & a_1 & c_1 & o_1 \\ p_2 & a_2 & c_2 & o_2 \\ p_3 & a_3 & c_3 & o_3 \\ p_4 & a_4 & c_4 & o_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Donde:

$$p_1 = -\cos(t_4) * (\sin(t_3) * ((0.20077 * \cos(t_2 - 90) * \sin(t_1 + 90)) - (0.44807 * \cos(t_1 + 90) * \sin(t_2 - 90)) + 0.79923) - \cos(t_3) * (\cos(t_1 + 90) * \cos(t_2 - 90) + (0.44807 * \sin(t_1 + 90) * \sin(t_2 - 90))) - \sin(t_4) * (\cos(t_3) * ((0.20077 * \cos(t_2 - 90) * \sin(t_1 + 90)) - (0.44807 * \cos(t_1 + 90) * \sin(t_2 - 90)) + 0.79923) + \sin(t_3) * (\cos(t_1 + 90) * \cos(t_2 - 90) + (0.44807 * \sin(t_1 + 90) * \sin(t_2 - 90))))$$

$$p_2 = \cos(t_4) * (\sin(t_3) * ((0.79923 * \cos(t_1 + 90)) + (0.20077 * \cos(t_1 + 90) * \cos(t_2 - 90)) + (0.44807 * \sin(t_1 + 90) * \sin(t_2 - 90))) - \cos(t_3) * ((0.44807 * \cos(t_1 + 90) * \sin(t_2 - 90)) - \cos(t_2 - 90) * \sin(t_1 + 90))) + \sin(t_4) * (\cos(t_3) * ((0.79923 * \cos(t_1 + 90)) + (0.20077 * \cos(t_1 + 90) * \cos(t_2 - 90)) + (0.44807 * \sin(t_1 + 90) * \sin(t_2 - 90))) + \sin(t_3) * ((0.44807 * \cos(t_1 + 90) * \sin(t_2 - 90)) - \cos(t_2 - 90) * \sin(t_1 + 90)))$$

$$p_3 = -\cos(t_4) * (\sin(t_3) * ((0.40058 * \cos(t_2 - 90)) - 0.40058) - (0.894 * \sin(t_2 - 90) * \cos(t_3))) - \sin(t_4) * (\cos(t_3) * ((0.40058 * \cos(t_2 - 90)) - 0.40058) + (0.894 * \sin(t_2 - 90) * \sin(t_3)))$$



$$p4= 0$$

$$a1= \sin(t4)*(\sin(t3)*((0.20077*\cos(t2 - 90)*\sin(t1 + 90)) - (0.44807*\cos(t1 + 90)*\sin(t2 - 90)) + 0.79923) - \cos(t3)*(\cos(t1 + 90)*\cos(t2 - 90) + (0.44807*\sin(t1 + 90)*\sin(t2 - 90)))) - \cos(t4)*(\cos(t3)*((0.20077*\cos(t2 - 90)*\sin(t1 + 90)) - (0.44807*\cos(t1 + 90)*\sin(t2 - 90)) + 0.79923) + \sin(t3)*(\cos(t1 + 90)*\cos(t2 - 90) + (0.44807*\sin(t1 + 90)*\sin(t2 - 90))))$$

$$a2= \cos(t4)*(\cos(t3)*((0.79923*\cos(t1 + 90)) + (0.20077*\cos(t1 + 90)*\cos(t2 - 90)) + (0.44807*\sin(t1 + 90)*\sin(t2 - 90)))) + \sin(t3)*((0.44807*\cos(t1 + 90)*\sin(t2 - 90)) - \cos(t2 - 90)*\sin(t1 + 90)) - \sin(t4)*(\sin(t3)*((0.79923*\cos(t1 + 90)) + (0.20077*\cos(t1 + 90)*\cos(t2 - 90)) + (0.44807*\sin(t1 + 90)*\sin(t2 - 90)))) - \cos(t3)*((0.44807*\cos(t1 + 90)*\sin(t2 - 90)) - \cos(t2 - 90)*\sin(t1 + 90))$$

$$a3= \sin(t4)*(\sin(t3)*((0.40058*\cos(t2 - 90)) - 0.40058) - (0.894*\sin(t2 - 90)*\cos(t3))) - \cos(t4)*(\cos(t3)*((0.40058*\cos(t2 - 90)) - 0.40058) + (0.894*\sin(t2 - 90)*\sin(t3)))$$

$$a4= 0$$

$$c1= (0.40058*\cos(t2 - 90)*\sin(t1 + 90)) - (4026203041061939*\cos(t1 + 90))/4503599627370496 - 16249305912998692073837066972457/40564819207303340847894502572032$$

$$c2= (0.40058*\cos(t1 + 90)) - (0.894*\sin(t1 + 90)) - (0.40058*\cos(t1 + 90)*\cos(t2 - 90))$$

$$c3= (0.79923*\cos(t2 - 90)) + 0.20077$$

$$c4= 0$$

$$o1= (0.312*\cos(t11 + 90)) - (2*\sin(t3)*((0.20077*\cos(t2 - 90)*\sin(t1 + 90)) - (0.44807*\cos(t1 + 90)*\sin(t2 - 90)) + 0.79923))/5 + (2*\cos(t3)*(\cos(t1 + 90)*\cos(t2 - 90) + (0.44807*\sin(t1 + 90)*\sin(t2 - 90))))/5 - (17*\cos(t4)*(\sin(t3)*((0.20077*\cos(t2 + 90)*\sin(t1 + 90)) - (0.44807*\cos(t1 + 90)*\sin(t2 - 90)) + 0.79923) - \cos(t3)*(\cos(t1 + 90)*\cos(t2 - 90) + (0.44807*\sin(t1 + 90)*\sin(t2 - 90)))))/50 - (17*\sin(t4)*(\cos(t3)*((0.20077*\cos(t2 - 90)*\sin(t1 + 90)) - (0.44807*\cos(t1 + 90)*\sin(t2 - 90)) + 0.79923) + \sin(t3)*(\cos(t1 + 90)*\cos(t2 - 90) + (0.44807*\sin(t1 + 90)*\sin(t2 - 90)))))/50 + 0.12516$$

$$o2= (0.312*\sin(t11 + 90)) - (0.12516*\cos(t1 + 90)) + (2*\sin(t3)*((0.79923*\cos(t1 + 90)) + (0.20077*\cos(t1 + 90)*\cos(t2 - 90)) + (0.44807*\sin(t1 + 90)*\sin(t2 - 90))))/5 + (17*\cos(t4)*(\sin(t3)*((0.79923*\cos(t1 + 90)) + (0.20077*\cos(t1 + 90)*\cos(t2 - 90)) + (0.44807*\sin(t1 + 90)*\sin(t2 - 90)))) - \cos(t3)*((0.44807*\cos(t1 + 90)*\sin(t2 - 90)) - \cos(t2 - 90)*\sin(t1 + 90)))/50 + (17*\sin(t4)*(\cos(t3)*((0.79923*\cos(t1 + 90)) + (0.20077*\cos(t1 + 90)*\cos(t2 - 90)) + (0.44807*\sin(t1 + 90)*\sin(t2 - 90)))) + \sin(t3)*((0.44807*\cos(t1 + 90)*\sin(t2 - 90)) - \cos(t2 - 90)*\sin(t1 + 90)))/50 - (2*\cos(t3)*((0.44807*\cos(t1 + 90)*\sin(t2 - 90)) - \cos(t2 - 90)*\sin(t1 + 90)))/5$$

$$o3= (0.3576*\sin(t2 - 90)*\cos(t3)) - (2*\sin(t3)*((0.40058*\cos(t2 - 90)) - 0.40058))/5 - (17*\cos(t4)*(\sin(t3)*((0.40058*\cos(t2 - 90)) - 0.40058) - (0.894*\sin(t2 - 90)*\cos(t3))))/50 - (17*\sin(t4)*(\cos(t3)*((0.40058*\cos(t2 - 90)) - 0.40058) + (0.894*\sin(t2 - 90)*\sin(t3))))/50 - 0.06273$$

$$o4= 1$$

Los actuadores que se utilizarán en este sistema se obtienen aplicando la metodología de Euler-Lagrange, esta se basa en el cálculo de la función lagrangiana que depende de la energía cinética y potencial de un sistema [13].

$$T(t) = D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + c(q) \quad (9)$$

Donde:

D(q)=Matriz simétrica de inercia.

$$D_{ik} = \sum_{j=\max(i,k)}^n Tr(U_{jk}J_jU_{ji}^T) \quad i, k = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$\ddot{q}$  =Vector de aceleración de cada una de las articulaciones.  
 $h = (q, \dot{q})$  =Vector de fuerza de coriolis y centrífuga no lineal.  
 $c(q)$  =Vector de fuerza gravitacional.

Cabe señalar que las variables generalizadas  $q, \dot{q}, \ddot{q}$  dependen del tiempo.

Con estos valores se calculó la cinemática y dinámica del sistema mecánico y se utilizó el algoritmo de Euler-Lagrange para obtener el par de los motores, además se calculó el factor de seguridad, teniendo los siguientes valores para los motores:

$M_1$ :1.95Nm  
 $M_2$ :10.5Nm  
 $M_3$ :16.5Nm  
 $M_4$ :5.25Nm

### 3. Resultados

El rehabilitador de hombro se construye con las siguientes piezas: base para antebrazo, base para brazo, barra de transmisión, base de motores para la transmisión, base para el motor más grande, soporte, base del mecanismo. Los mecanismos finales se presentan en la figura 4.

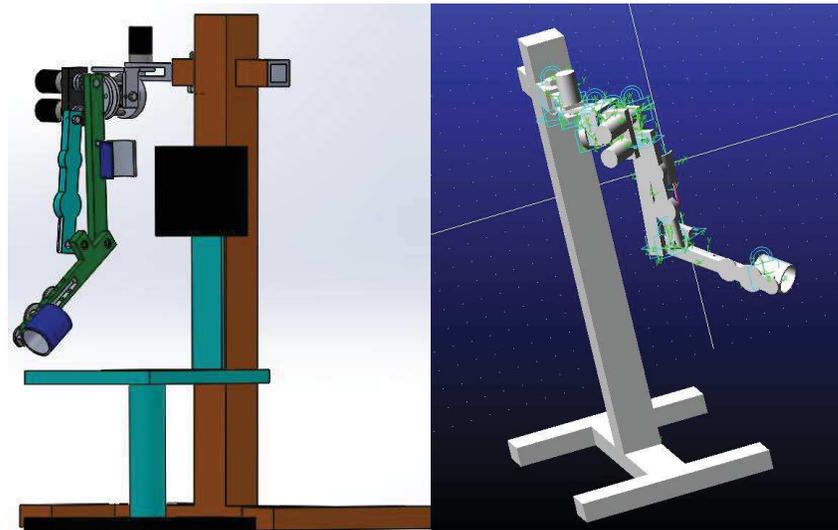


Figura 4. Rehabilitador de hombro

Se realizó la simulación de los movimientos del rehabilitador; la herramienta utilizada es ADAMS View mostrada en figura 4 y en SolidWorks® mostrada en la figura 5.

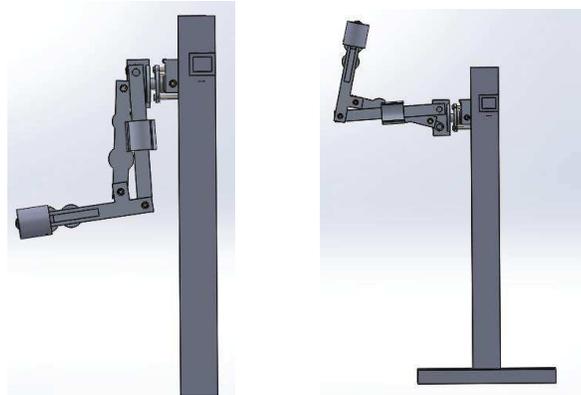


Figura 5. Posición inicial del mecanismo y posición del mecanismo a 90°.

Para emular los movimientos requeridos para la rehabilitación se inició con el mecanismo en reposo durante 3 seg., posteriormente el mecanismo tardó 15 seg. en llegar a la posición de 90°, como se muestra en la figura 5.

### 3.1 Generación de trayectorias

La implementación del generador de trayectorias tiene por objeto calcular los valores de cada articulación, dadas las condiciones iniciales de posición, orientación, velocidad y aceleración deseadas.

Para este diseño se utilizaron polinomios de primer y quinto orden, las ecuaciones utilizadas en los polinomios se utilizaron del trabajo de [13], la autora Sosa-Méndez realizó estos polinomios para seguir la trayectoria de los movimientos de flexión-extensión, rotación interna-externa, abducción-aducción.

Algunos ejemplos de las gráficas para los movimientos básicos de rehabilitación realizados en SolidWorks®, con el prototipo que se propone son los mostrados en las figuras 6, 7 y 8.

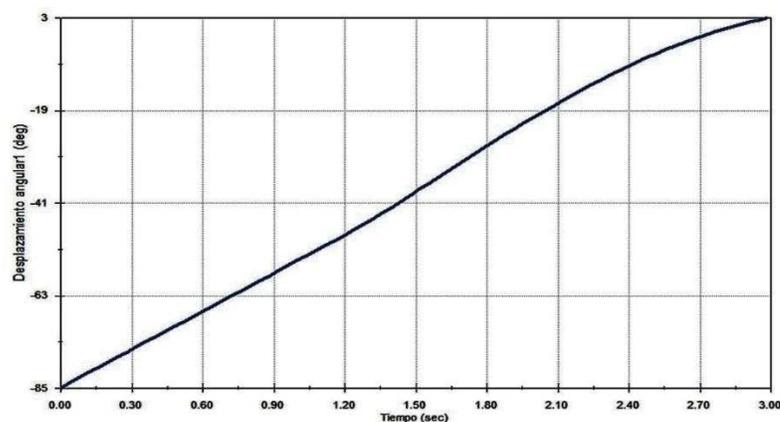


Figura6. Movimiento en 90° flexión. Eq= 30°t [13].

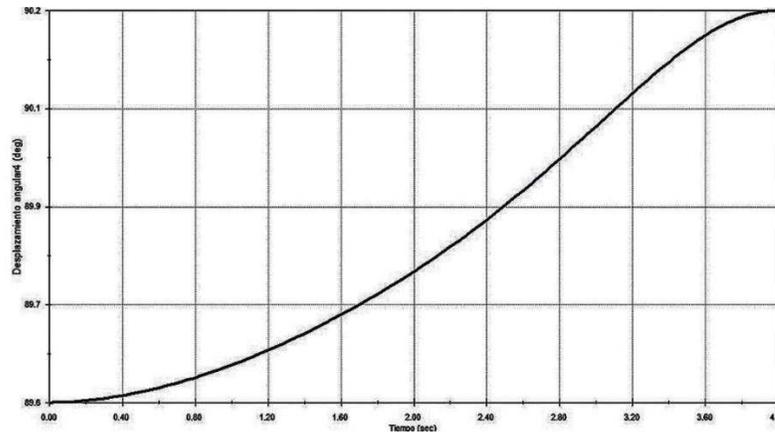


Figura 7. Movimiento en 60° abducción [13].  $E_q = 11,25t^2 - 1,875t^3$

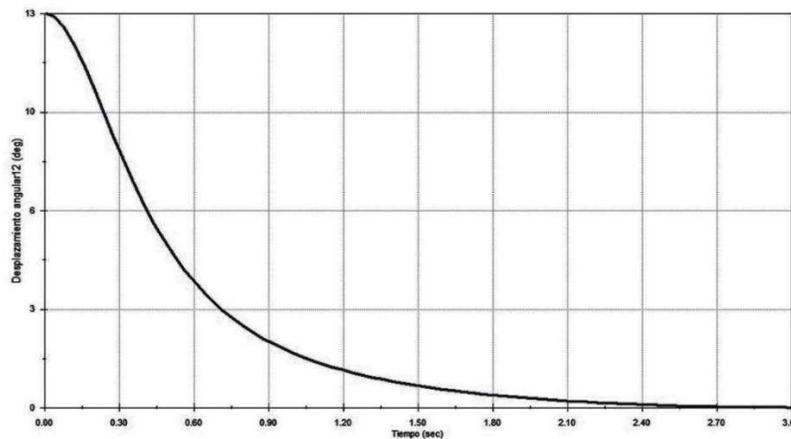


Figura 8. Movimiento en 40° rotación externa [13].  $E_q = 13,33t^2 - 2,963t^3$

### 3.2 Análisis mecánico

A las piezas del mecanismo se le hicieron análisis de desplazamientos, deformaciones y tensiones de algunas de las piezas para validar que soportan el peso del miembro superior y que no se presenten rupturas. El material seleccionado para la construcción del rehabilitador es la aleación de aluminio 7075.

Para realizar el análisis de esfuerzos a la pieza “base antebrazo”, se obtiene la fuerza que será aplicada a la pieza;  $F = 19.42 N$ , para la pieza “soporte del mecanismo” la fuerza que será aplicada es de  $F = 38.38N$  y finalmente a la pieza “base para brazo” la fuerza a aplicar es  $F = 36.52N$ . Los resultados del análisis realizado en SolidWorks® se muestran en las figuras 9, 10, y 11.

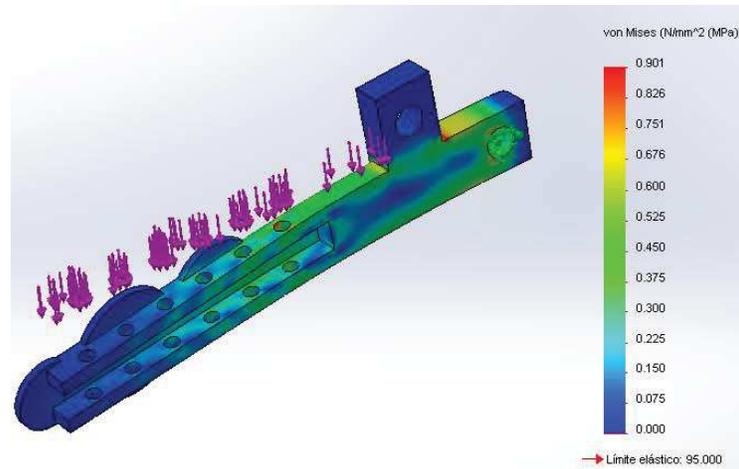


Figura 9. Base para antebrazo.

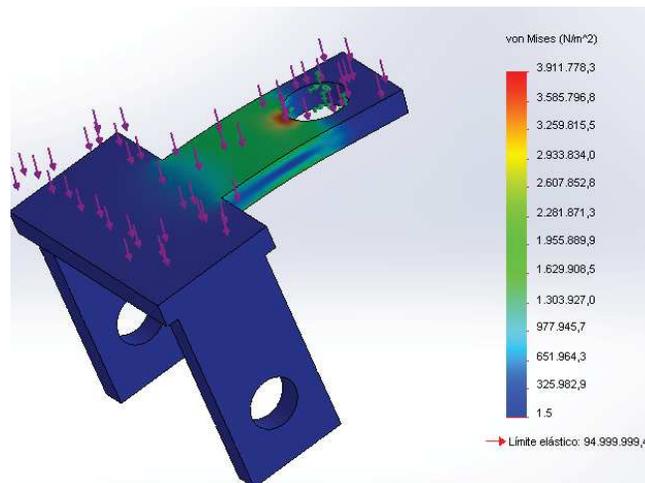


Figura 10. Soporte del mecanismo.

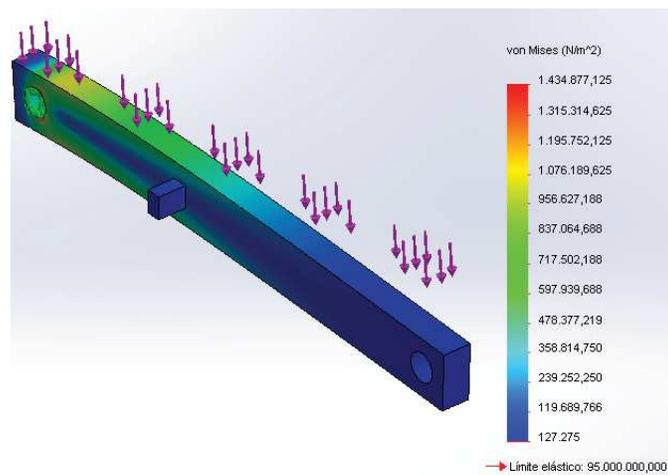


Figura 11. Base para brazo.

Como se observa, no existen condiciones críticas en ni una de las piezas analizadas. Los factores de seguridad de las piezas se muestran en la tabla 4.



**Tabla 4. Factores de seguridad**

<b>Pieza</b>	<b>Valor del factor de seguridad</b>
Base para antebrazo	105.47
Soporte del mecanismo	39.33
Base para brazo	66.20

De la tabla 4 se observa que los valores del factor de seguridad son mayores a 1, de acuerdo con [14], esto nos indica que el diseño de las piezas es seguro para el tipo de carga que deben soportar.

En la tabla 5 se muestran los valores de las masas de las piezas que conforman el mecanismo.

**Tabla 5. Masas**

<b>Pieza</b>	<b>Masa</b>
Base antebrazo	.70358kg
Base brazo	1.0537kg
Barra de transmisión	.7557kg
Base de motores	.60556kg
Soporte de motor	.416kg
Soporte del mecanismo	.37881kg

### **3.3. Control de motores**

Para controlar el giro de los motores, así como su velocidad, se utiliza el módulo motor-driver BTS796043A. Este módulo es un puente H que trabaja con una tensión de operación de 24volts, soporta una corriente de 43 A máxima y cuenta con un PWM, el cual puede trabajar hasta 25kHz.

Para realizar el control del mecanismo se utilizará la placa de Arduino mega, ya que se ajusta al número de entradas y salidas necesarias en comparación con la tarjeta Arduino uno, la cual no posee el número de puertos necesarios para esta aplicación. El módulo de control de motores necesita 4 salidas del Arduino dos de ellas son para indicar el sentido de giro del motor (R\_EN y L\_EN) y las restantes sirven para indicar la velocidad de giro dependiendo el sentido (LPWM y RPWM). En la figura 12 se muestran las conexiones para el control del rehabilitador.

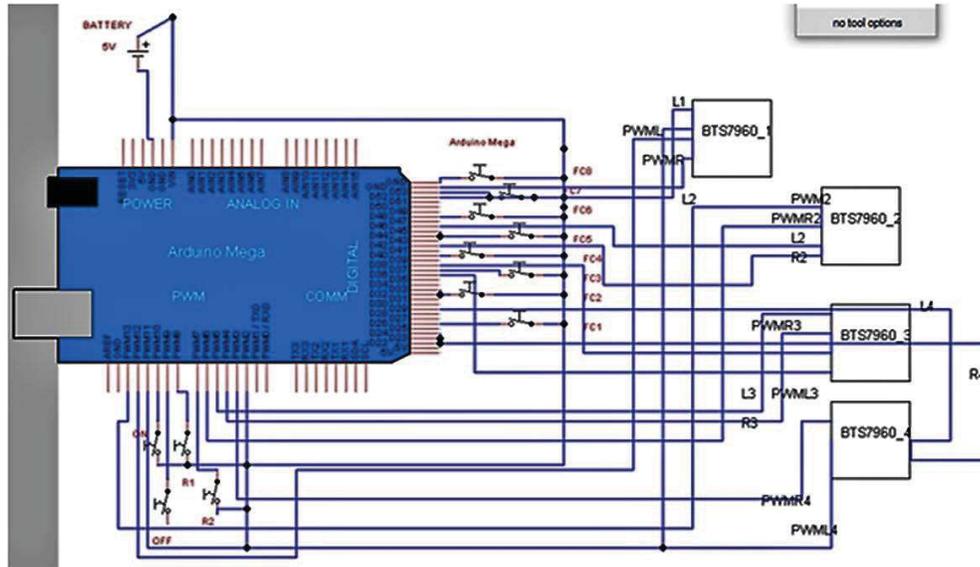


Figura 12. Conexiones para el control del rehabilitador.

Al realizar la simulación los resultados obtenidos fueron los mostrados en las figuras 13 y 14:

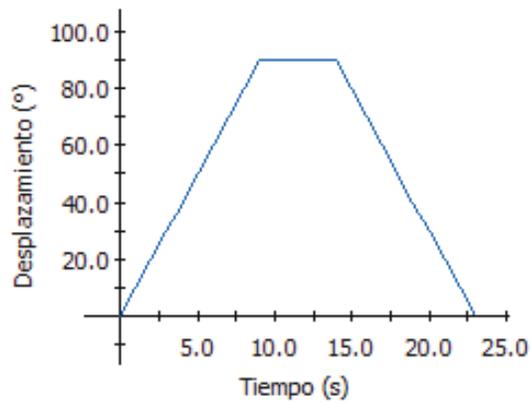
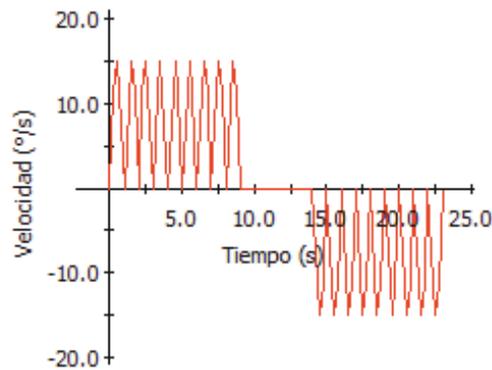


Figura 13. Desplazamiento del motor.



**Figura 14. Velocidad del motor.**

De las figuras 13 y 14, se puede observar que de 0 a 9 seg., el motor comienza el movimiento que permite que la articulación se eleve hasta llegar a los 90° medidos desde la posición inicial; la velocidad con la cual se realiza este movimiento es de 15 (°/s).

## 4. Conclusiones

Con base en los cálculos se obtuvieron los pares para mover cada una de las articulaciones del mecanismo; por medidas de seguridad los valores obtenidos se aumentaron en un 50%, al realizar el cálculo del factor de seguridad utilizando el método de Puggsley, se obtuvo un resultado mayor a 1, indicando que los valores de los pares son adecuados.

Se presentaron los valores de los pares requeridos para los motores y además se propuso una tarjeta para poder controlarlos.

Para la propuesta de automatización se presentó un diagrama eléctrico para realizar el control del mecanismo; el microcontrolador seleccionado fue el Arduino mega debido a que cuenta con un amplio número de entradas y salidas, además de contar con varios pwm's que son fácilmente manipulables, además de tener la versatilidad de poder programarlo en un corto periodo de tiempo y poder hacer las modificaciones que se requieran.

Se realizaron simulaciones con la finalidad de observar cómo se comportará el mecanismo; los tiempos de ejecución fueron largos con la finalidad de poder obtener resultados claros.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACyT por el apoyo a este trabajo a través del proyecto No. 621 del programa de Cátedras.

## Referencias

- [1] Lo H. S. and Xie S. Q., "Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation: State of the art and future prospects," *Med. Eng. Phys.*, vol. 34, no. 3, pp. 261–268, 2012.
- [2] Garrido J., Yu W., and Li X., "Modular design and control of an upper limb exoskeleton," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 5, pp. 2265–2271, 2016.
- [3] Jobbágy B., Šimšík D., Marek J., Karchňák J., and Onofrejová D., "Robotic Exoskeleton for Rehabilitation of the Upper Limb," *Am. J. Mech. Eng.*, vol. 2, no. 7, pp. 299–302, 2014.
- [4] Sosa-Mendez D., Arias-Montiel M., and Lugo-González E., "Diseño de un prototipo de exoesqueleto para rehabilitación del hombro," *Revista Mexicana de ingeniería Biomédica*, vol. 38, no. 1, pp. 322–335, 2017.
- [5] Stopforth R., "Control investigation of a customizable/adjustable exoskeleton upper-limb," *Ind.*



- Robot An Int. J.*, vol. 40, pp. 132–142, 2013.
- [6] G. M. J., “Diseño mecánico de un robot serial para rehabilitación,” Universidad Politécnica de Madrid, 2016.
  - [7] Akdogan E., “Upper limb rehabilitation robot for physical therapy: design, control, and testing,” *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 24, pp. 911 – 934, 2016.
  - [8] Nokleby S. B. and Podhorodeski R. P., “Optimization-Based Synthesis of Grashof Geared Five-Bar,” *J. Mech. Des.*, vol. 123, no. December 2001, pp. 529–534, 2016.
  - [9] Shetty D. and Kolk R. A., *Mechatronics system design*, 2nd ed. USA: CENGAGE Learning, 2011.
  - [10] Pons J. L., “Wearable robots: biomechatronic exoskeletons.,” *John Wiley Sons*, 2008.
  - [11] Sosa-Mendez D., “Desarrollo de un exoesqueleto para rehabilitación de hombro,” tesis de maestría, Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2017.
  - [12] Ávila-Chaurand R., Prado-León L. R., and González-Muñoz E. L., “Dimensiones antropométricas. Población Latinomaericana. México.Cuba.Colombia.Chile.Venezuela.,” *Univ. Guadalajara.Centro Univ. Arte, Arqit. y Diseño.*, 1999.
  - [13] Fu K.S., González R. C. and Lee C.S.G., “Robótica: control, detección, visión e inteligencia”, McGraw-Hill ed., México, primera edición, 1989.
  - [14] Ríos Q. L. C. and Roncancio H. E., “Análisis y desarrollo de un programa de selección rápida De factores de seguridad, para el diseño de elementos mecánicos”, *Scientia et Technica* Año XIII, No 35, agosto de 2007.



# Aplicación de Algoritmos Genéticos en la Planeación de Trayectorias de un Robot Manipulador Marca Mitsubishi RV-2AJ

Ambrocio Delgado Rocío<sup>1</sup>, Lugo González Esther<sup>2</sup>, Petrilli Barceló Alberto Elías<sup>1</sup>

<sup>1</sup>División de Posgrado, Universidad Tecnológica de la Mixteca

<sup>2</sup>CONACyT- Universidad Tecnológica de la Mixteca  
Huajuapán de León, Oaxaca, México

## Resumen

*En el presente trabajo se realiza un análisis de la cinemática directa e inversa del brazo manipulador Mitsubishi MELFA RV-2AJ. Usando Algoritmos Genéticos (AG) se calculan los ángulos de los eslabones para seguir una trayectoria deseada. Con el software AdamsView™, que es un programa para simulación y análisis de mecanismos, se verifica que los ángulos calculados son óptimos para seguir una trayectoria. Para hacer que el brazo manipulador tenga movimientos suaves se proponen dos formas: con un control de velocidad de los motores y con polinomios de quinto orden. Como resultados se presenta la comparativa entre los dos métodos para obtener una trayectoria suave.*

**Palabras clave:** AdamsView™, Algoritmos Genéticos, control de velocidad, MatLab®, polinomios de quinto orden.

## 1. Introducción

Los robots industriales MELFA pueden realizar tareas simples como recoger cosas pequeñas o complejas como son los montajes o ensamblajes. Estos robots están equipados con precisión y velocidad, que se combinan con opciones inteligentes como la visión 3D, sensores de fuerza e integración PLC [1].

El brazo manipulador robótico MELFA RV-2AJ está diseñado para aplicaciones donde no hay espacio y soporta una carga de hasta 2 kg. Tiene un alcance (con la pinza hacia abajo) de 410 mm y una velocidad máxima de 2,100 mm/s con repetitividad de 0.02 mm. Este brazo manipulador es del tipo serial y posee 5 grados de libertad (GDL), cada uno de los grados de libertad se encuentra en una articulación de tipo rotacional, no posee cuarta articulación J4. El rango de movilidad del brazo (grados) es: J1=300(-150 a +150), J2=180(-60 a +120), J3=230(-110 a +120), J5=180(-90 a +90), J6=400(-200 a +200) [2].

Para que el manipulador efectúe una tarea determinada, es necesario establecer la relación espacial entre la base del manipulador y el efector final, a esta relación se le conoce como análisis cinemático. El análisis cinemático de un robot manipulador consiste en el estudio del movimiento del mismo con respecto a un marco de referencia sin considerar las fuerzas que provocan el movimiento. La cinemática se puede clasificar en cinemática directa o inversa. Este estudio es básico para la planeación de movimientos.

El propósito de la planeación de movimientos es determinar las trayectorias que puede realizar para llevar a cabo un proceso, así como la descripción matemática que garantice la ejecución de una acción en específico. La descripción del movimiento puede estar basada en el espacio de trabajo o en la configuración de las articulaciones del brazo manipulador.



Los Algoritmos Genéticos se emplean en robots manipuladores para realizar la planeación de trayectorias y en robots móviles sobre ruedas que están en ambientes dinámicos [3]. Otro ejemplo es la optimización de las dimensiones de un robot paralelo [4], así también se emplean desde la programación de una cortadora de pasto autónoma hasta la solución de laberintos por un robot móvil [5].

En este trabajo se presenta la planeación de la trayectoria del manipulador Mitsubishi RV-2AJ utilizando Algoritmos Genéticos para obtener la cinemática inversa del mismo con el objetivo de obtener movimientos suaves para llegar a un punto determinado.

## 2. Metodología

La metodología que se usó para resolver la cinemática inversa del brazo manipulador Mitsubishi RV-2AJ con Algoritmos Genéticos, así como en el control de velocidad en los motores del manipulador, es la que se describe a continuación y se basa en las siguientes actividades: planteamiento del problema, obtención de la cinemática directa para obtener la función objetivo, diseñar el algoritmo genético para optimizar los ángulos de las articulaciones, proponer un polinomio de 5 orden para que el manipulador siga la trayectoria, simulación en AdamsView™ de los puntos obtenidos con el polinomio y de los ángulos obtenidos con los AG, cosimulación de AdamsView-Simulink y análisis de resultados.

### 2.1 Planteamiento del problema

El problema general de los brazos manipuladores es realizar una tarea específica, en este caso seguir una trayectoria predeterminada en el menor tiempo posible con movimientos suaves y más precisos en sus articulaciones.

El brazo manipulador tiene que seguir una trayectoria con movimientos suaves. Para lograr esto primero se calculan los ángulos de las articulaciones con Algoritmos Genéticos con la función *ga* de MatLab® y de esta forma optimizar el movimiento del manipulador para alcanzar un punto. Los movimientos suaves se pueden hacer de dos formas: haciendo uso de los polinomios de quinto orden o con un control de velocidad.

Para resolver dicha problemática se utiliza la metodología de la optimización [6]:

**Identificación de las variables:** Las variables a considerar son los ángulos de las articulaciones que toma el manipulador para llegar a una posición determinada y la corriente que se les suministra a los motores del brazo manipulador, además del tiempo en el que tiene que realizar una trayectoria.

**Restricciones:** Se consideran las restricciones mecánicas de las articulaciones del brazo manipulador para no tener singularidades en los movimientos, así como el tiempo en el que se tiene que hacer la trayectoria.

**Identificación de las variables de entrada y salida:** Las variables de entrada que se ocupan en los Algoritmos Genéticos son los puntos que conforman la trayectoria que debe seguir el manipulador y las variables de salida son los ángulos que debe tomar el manipulador para alcanzar un punto en específico. En el control de velocidad la variable de entrada es la corriente que se le suministra al motor y la variable de salida es la velocidad angular del motor, para cada articulación.

**Ecuaciones matemáticas:** Las ecuaciones que se emplean son: matrices de transformación homogénea de las articulaciones obtenidas con los parámetros de Denavit-Hartenberg, distancias euclidianas, polinomio de quinto orden y la función de transferencia del motor de AC, las cuales se describen en el desarrollo de este trabajo.



**Revisión de los modelos y corrección:** Con los ángulos óptimos obtenidos con los Algoritmos Genéticos se calculan los polinomios de quinto orden los cuales se agregan en los movimientos de las articulaciones en Adams. Para el control se fijan los ángulos obtenidos con STEP en AdamsView™ y se realiza una cosimulación AdamsView™-MatLab® para comprobar el funcionamiento del control de velocidad en el manipulador.

### 3. Desarrollo

#### 3.1 Cinemática directa

El modelo cinemático directo permite determinar el espacio de trabajo del brazo manipulador. Para resolver el problema de la cinemática directa se emplean los parámetros de Denavit-Hartenberg [7], los cuales varían dependiendo del mecanismo, ya que tienen diferentes formas y configuraciones. En la figura 1 se muestran las dimensiones del brazo Mitsubishi RV-2AJ, que se emplean para encontrar los parámetros de Denavit-Hartenberg.

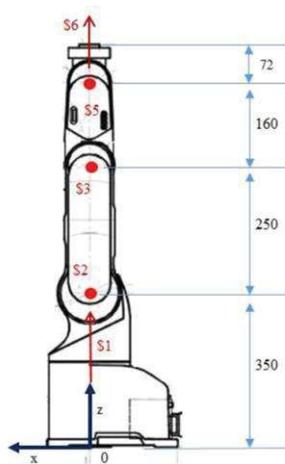


Figura 1. Dimensiones del brazo manipulador [8].

Los parámetros de Denavit-Hartenberg se presentan en la Tabla 1, que son obtenidos a partir de la configuración inicial propuesta del brazo manipulador mostrada en la figura 2.

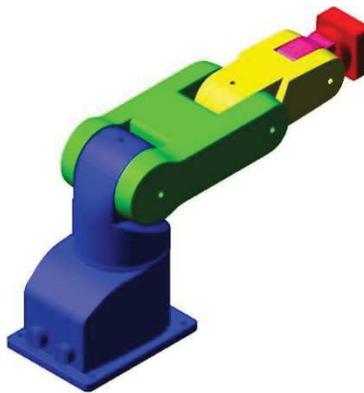


Figura 2. Brazo manipulador en posición inicial.



**Tabla 1. Parámetros de Denavit-Hartenberg**

Articulación	$\theta_i$ (°)	$d_i$ (mm)	$\alpha_i$ (°)	$a_i$ (mm)
A1	$\theta_1$	300	90	0
A2	$\theta_2$	0	0	250
A3	$\theta_3$	0	0	160
A4	$\theta_4$	0	-90	0
A5	$\theta_5$	72	0	0

Lo que sigue es encontrar las matrices de transformación homogénea, en este caso se ocupa la matriz estándar que se muestra en la ecuación (1) en donde se sustituirán los parámetros de la Tabla 1.

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos \alpha_n & \sin \theta_n \sin \alpha_n & a_n \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cos \alpha_n & -\cos \theta_n \sin \alpha_n & a_n \sin \theta_n \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \theta_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Así, sustituyendo los parámetros de Denavit-Hartenberg, se tiene lo siguiente:

$${}^5T_0 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

En donde

$$\begin{aligned} a_{11}: & C1*C2*C3*C4*C5 - C1*S2*S3*C4*C5 - C1*C2*S3*S4*C5 - C1*S2*C3*S4*C5 - S1*S5 \\ a_{21}: & S1*C2*C3*C4*C5 - S1*S2*S3*C4*C5 - S1*C2*S3*S4*C5 - S1*S2*C3*S4*C5 + C1*S5 \\ a_{31}: & S2*C3*C4*C5 + C2*S3*C4*C5 - S2*S3*S4*C5 + C2*C3*S4*C5 \\ a_{12}: & -C1*C2*C3*C4*S5 + C1*S2*S3*C4*S5 + C1*S2*S3*S4*S5 + C1*S2*C3*S4*S5 - S1*C5 \\ a_{22}: & -S1*C2*C3*C4*S5 + S1*S2*S3*C4*S5 + S1*C2*S3*S4*S5 + S1*S2*C3*S4*S5 + C1*C5 \\ a_{32}: & -S2*C3*C4*S5 - C2*S3*C4*S5 + S2*S3*S4*S5 - C2*C3*S4*S5 \\ a_{13}: & -C1*C2*C3*S4 + C1*S2*S3*S4 - C1*C2*S3*C4 - C1*S2*C3*C4 \\ a_{23}: & -S1*C2*C3*S4 + S1*S2*S3*S4 - S1*C2*S3*C4 - S1*S2*C3*C4 \\ a_{33}: & -S2*C3*S4 - C2*S3*S4 - S2*S3*C4 + C2*C3*C4 \\ a_{14}: & -72*C1*C2*C3*S4 + 72*C1*S2*S3*S4 - 72*C1*C2*S3*C4 - 72*C1*S2*C3*S4 + \\ & 160*C1*C2*C3 - 160*C1*S2*S3 + 250*C1*C2 \\ a_{24}: & -72*S1*C2*C3*S4 + 72*S1*S2*S3*S4 - 72*S1*C2*S3*C4 - 72*S1*S2*C3*C4 + \\ & 160*S1*C2*C3 - 160*S1*S2*S3 + 250*S1*C2 \\ a_{34}: & -72*S2*C3*S4 - 72*C2*S3*S4 - 72*S2*S3*C4 + 72*C2*C3*C4 + 160*S2*C3 + 160*C2*S3 + \\ & 250*S2 + 300 \end{aligned}$$

Siendo  $S1 = \sin \theta_1$ ,  $C1 = \cos \theta_1$ ,  $S2 = \sin \theta_2$ ,  $C2 = \cos \theta_2$ ,  $S3 = \sin \theta_3$ ,  $C3 = \cos \theta_3$ ,  $S4 = \sin \theta_4$ ,  $C4 = \cos \theta_4$ ,  $S5 = \sin \theta_5$ ,  $C5 = \cos \theta_5$ .

La matriz de transformación homogénea mostrada en la ecuación (2) se obtiene de multiplicar las matrices  ${}^1T_0$ ,  ${}^2T_1$ ,  ${}^3T_2$ ,  ${}^4T_3$  y  ${}^5T_4$ , la cual representa la posición y orientación final del manipulador.



Derivado del desarrollo, se obtiene la función objetivo mostrada en la ecuación (3), que se utilizará en los AG para determinar los ángulos que seguirán en la trayectoria propuesta.

De la ecuación 2, se utilizan las variables  $a_{14}$ ,  $a_{24}$  y  $a_{34}$ , y con esto se resuelve la función euclidiana mostrada en la ecuación (3)

$$d = \sqrt{(P_{xd} - P_x)^2 + (P_{yd} - P_y)^2 + (P_{zd} - P_z)^2} \quad (3)$$

Donde  $P_{xd}$  es la posición deseada en X,  $P_{yd}$  es la posición deseada en Y y  $P_{zd}$  es la posición deseada en Z.

### 3.2 Diseño del algoritmo genético

Los Algoritmos Genéticos son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización [9]. Estos métodos se basan en el proceso genético de los seres vivos. A través del tiempo, las poblaciones evolucionan en su hábitat de acuerdo con los principios de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes. Los Algoritmos Genéticos imitan este proceso para ser capaces de crear soluciones a problemas cotidianos. Las evoluciones de dichas soluciones hacia valores óptimos del problema dependen de una adecuada codificación de las mismas. Los parámetros que se consideran en un Algoritmo Genético son: a) cromosoma, b) función objetivo, c) reproducción, d) cruce y d) mutación. La metodología se muestra en la figura 3.

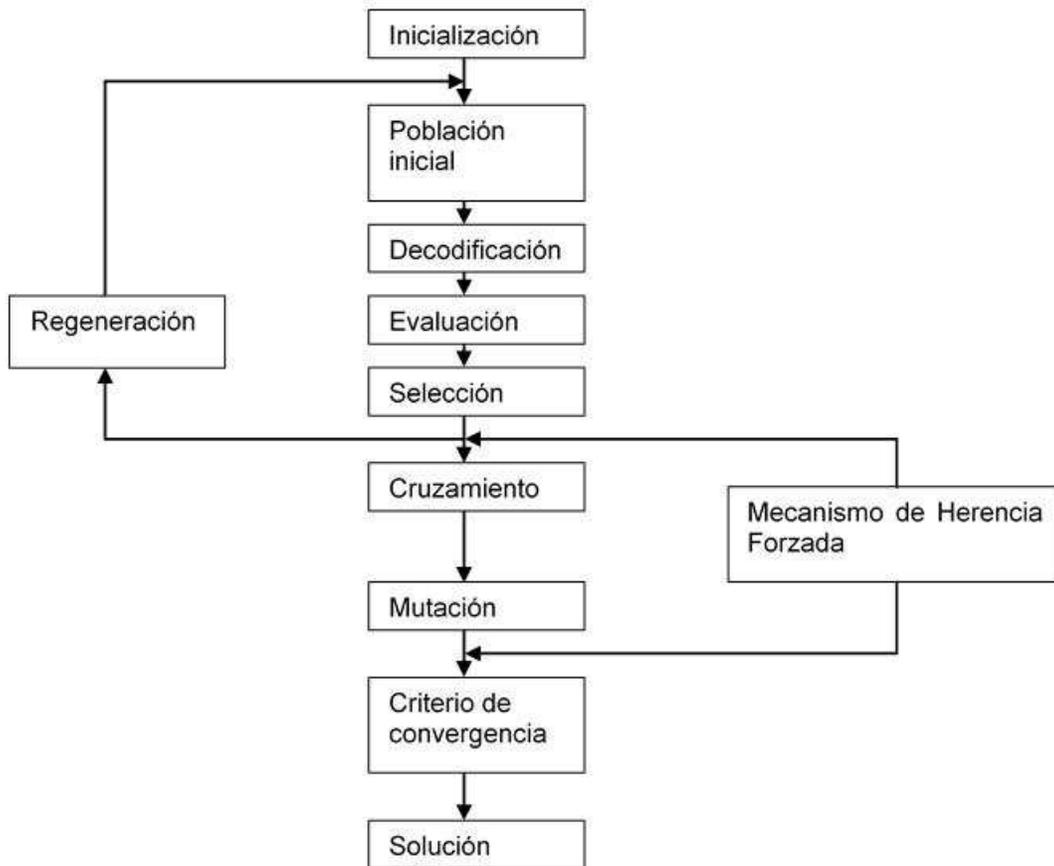


Figura 3. Metodología de los Algoritmos Genéticos [9].



Las variables que se consideran para formar el cromosoma en el Algoritmo Genético son los ángulos de orientación de las articulaciones, es decir, un vector 4 dimensional  $[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]$ . El ángulo  $\theta_5$  no se toma en consideración debido a que no se va a manipular objeto alguno con el efector final. La función objetivo es la mostrada en la ecuación (3) y las restricciones son (grados):

- $-150 \leq \theta_1 \leq 150$
- $-60 \leq \theta_2 \leq 120$
- $-110 \leq \theta_3 \leq 120$
- $-90 \leq \theta_4 \leq 90$

Al hacer uso de los Algoritmos Genéticos se deben establecer los parámetros que se van a considerar para obtener el óptimo. En este caso se tomaron de la siguiente forma:

- Población = 100 individuos
- Generaciones = 200
- Selección = Roulette
- Cruce = 0.8
- Mutación = 0.001

Los parámetros antes mencionados se mandan a la función *ga* de MatLab® para calcular los ángulos óptimos para alcanzar un punto propuesto para generar una trayectoria. Las restricciones a las cuales está sometido el movimiento del brazo, deben plantearse en el Algoritmo para evitar singularidades en el movimiento del manipulador.

La posición del efector final se calcula haciendo uso solo de la cinemática directa del brazo manipulador. Esta posición se encuentra en los elementos  $a_{14}$ ,  $a_{24}$  y  $a_{34}$  que son  $P_x$ ,  $P_y$  y  $P_z$  respectivamente de la matriz resultante mostrada en la ecuación (2). Así:

$$P_x = -72*C1*C2*C3*S4 + 72*C1*S2*S3*S4 - 72*C1*C2*S3*C4 - 72*C1*S2*C3*S4 + 160*C1*C2*C3 - 160*C1*S2*S3 + 250*C1*C2$$

$$P_y = -72*S1*C2*C3*S4 + 72*S1*S2*S3*S4 - 72*S1*C2*S3*C4 - 72*S1*S2*C3*C4 + 160*S1*C2*C3 - 160*S1*S2*S3 + 250*S1*C2$$

$$P_z = -72*S2*C3*S4 - 72*C2*S3*S4 - 72*S2*S3*C4 + 72*C2*C3*C4 + 160*S2*C3 + 160*C2*S3 + 250*S2 + 300$$

Donde:  $S1 = \sin\theta_1$ ,  $C1 = \cos\theta_1$ ,  $S2 = \sin\theta_2$ ,  $C2 = \cos\theta_2$ ,  $S3 = \sin\theta_3$ ,  $C3 = \cos\theta_3$ ,  $S4 = \sin\theta_4$ ,  $C4 = \cos\theta_4$ .  
Los puntos propuestos para la trayectoria son:

- Punto 1:(300,150, 50)
- Punto 2:(300, 150, 200)
- Punto 3:(250, 300, 200)
- Punto 4:(250, 300, 50)
- Punto 5:(250, 300, 100)

Los ángulos obtenidos con la función *ga* de MatLab® son:

- Punto 1:  $\theta_1 = 26.5648$ ,  $\theta_2 = -42.7993$ ,  $\theta_3 = -9.7403$ ,  $\theta_4 = 3.1472$ .
- Punto 2:  $\theta_1 = 26.56442$ ,  $\theta_2 = -23.581$ ,  $\theta_3 = 2.4197$ ,  $\theta_4 = 57.7463$ .
- Punto 3:  $\theta_1 = 50.1943$ ,  $\theta_2 = -30.50755$ ,  $\theta_3 = 15.2753$ ,  $\theta_4 = -1.5099$ .
- Punto 4:  $\theta_1 = 50.1944$ ,  $\theta_2 = -26.6943$ ,  $\theta_3 = -26.5170$ ,  $\theta_4 = -44.4180$ .
- Punto 5:  $\theta_1 = 50.1934$ ,  $\theta_2 = -44.5031$ ,  $\theta_3 = 22.9239$ ,  $\theta_4 = -40.1674$ .



### 3.3 Polinomio de quinto orden para seguir la trayectoria

Una manera de generar trayectorias suaves es con una función polinomial de  $t$ . Suponiendo que en el tiempo  $t_i$  la  $n$ -ésima variable de una articulación satisfase

$$q_n(t_i) = q_i \quad (4)$$

$$\dot{q}_n(t_i) = 0 \quad (5)$$

$$\ddot{q}_n(t_i) = 0 \quad (6)$$

Y se quiere que llegue a los valores en  $t_f$

$$q_n(t_f) = q_f \quad (7)$$

$$\dot{q}_n(t_f) = 0 \quad (8)$$

$$\ddot{q}_n(t_f) = 0 \quad (9)$$

Al tener seis restricciones a satisfacer se requiere un polinomio con seis coeficientes independientes. Entonces se considera una trayectoria de quinto orden de la forma:

$$q(t) = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (10)$$

Tomando su primera y segunda derivada:

$$\dot{q}(t) = 5a_5 t^4 + 4a_4 t^3 + 3a_3 t^2 + 2a_2 t + a_1 \quad (11)$$

$$\ddot{q}(t) = 20a_5 t^3 + 12a_4 t^2 + 6a_3 t + 2a_2 \quad (12)$$

Al resolver este sistema de ecuaciones nos da los coeficientes  $a_5$ ,  $a_4$ ,  $a_3$ ,  $a_2$ ,  $a_1$  y  $a_0$  necesarios para construir los polinomios que formaran la trayectoria del manipulador. La solución es:

$$a_5 = \frac{6q_f}{(t_f - t_i)^5} - \frac{6q_i}{(t_f - t_i)^5} \quad (13)$$

$$a_4 = \frac{q_i(15t_f + 15t_i)}{(t_f - t_i)^5} - \frac{q_f(15t_f + 15t_i)}{(t_f - t_i)^5} \quad (14)$$

$$a_3 = \frac{q_f(10t_f^2 + 40t_f t_i + 10t_i^2)}{(t_f - t_i)^5} - \frac{q_i(10t_f^2 + 40t_f t_i + 10t_i^2)}{(t_f - t_i)^5} \quad (15)$$

$$a_2 = \frac{30q_i t_f t_i (t_f + t_i)}{(t_f - t_i)^5} - \frac{30q_f t_f t_i (t_f + t_i)}{(t_f - t_i)^5} \quad (16)$$

$$a_1 = \frac{30q_f t_f^2 t_i^2}{(t_f - t_i)^5} - \frac{30q_i t_f^2 t_i^2}{(t_f - t_i)^5} \quad (17)$$



$$a_0 = \frac{q_i t_f^3 (t_f^2 - 5t_f t_i + 10t_i^2)}{(t_f - t_i)^5} - \frac{q_f t_i^3 (10t_f^2 - 5t_f t_i + t_i^2)}{(t_f - t_i)^5} \quad (18)$$

Así, cada instante de tiempo  $t$  se estará evaluando en un polinomio formado por estos coeficientes.

Al conocer los ángulos que debe tomar el brazo manipulador para seguir la trayectoria de cinco puntos propuesta de forma óptima, al tener 4 ángulos y 5 puntos, se va a tener un total de 20 polinomios de quinto orden.

Los polinomios para llegar al primer punto propuesto son los siguientes:

$$\begin{aligned} f_{\theta_1} &= 265.6476t^2 - 398.4714t^3 + 159.3886t^5 \\ f_{\theta_2} &= -427.9934t^3 + 641.9901t^4 - 256.7960t^5 \\ f_{\theta_3} &= -97.4026t^3 + 146.1039t^4 - 58.4416t^5 \\ f_{\theta_4} &= 31.4718t^3 - 47.2077t^4 + 18.8831t^5 \end{aligned}$$

En la figura 5 se observa que la función planteada para el primer punto llega al ángulo deseado. Este mismo efecto se cumple para los 20 polinomios de quinto orden.

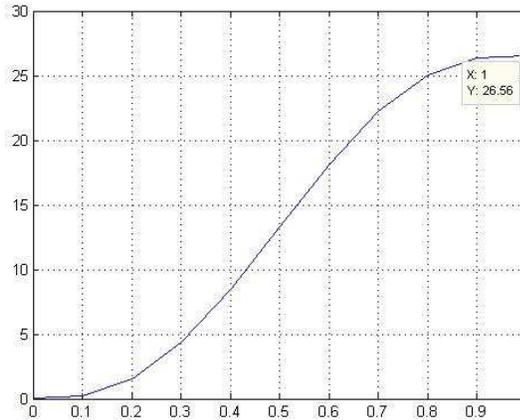


Figura 5. Gráfica de la función de quinto orden de  $\theta_1$  para el punto 1.

### 3.4 Simulación en AdamsView™

El objetivo de utilizar el programa ADAMSView™ es mostrar gráficamente que el robot puede seguir las trayectorias propuestas. Se realizaron las siguientes evaluaciones:

- 1) Implementación de la trayectoria con polinomio de quinto orden: Con los polinomios se calcularon diferentes puntos a lo largo de un tiempo establecido entre 0 y cinco segundos, teniendo un incremento en 1. Estos puntos se importan a Adams con la instrucción Spline como se muestra en la figura 6.
- 2) Implementación de sensores y comparación: Se hizo una cosimulación Adams-MatLab utilizando la función de transferencia de motores de AC, estas funciones se pueden encontrar

en la página web de la Universidad de Michigan [10]. En Adams la trayectoria se definió con STEP en 4 articulaciones del brazo manipulador. Los puntos propuestos para la trayectoria si son alcanzados con los ángulos calculados con Algoritmos Genéticos como se muestra en figura 7. El control de velocidad se hizo en Simulink™ como se muestra en la figura 8.

Se cambió el signo de los ángulos  $\theta_2$  y  $\theta_3$  para cumplir con el sentido de giro que está establecido en el programa.

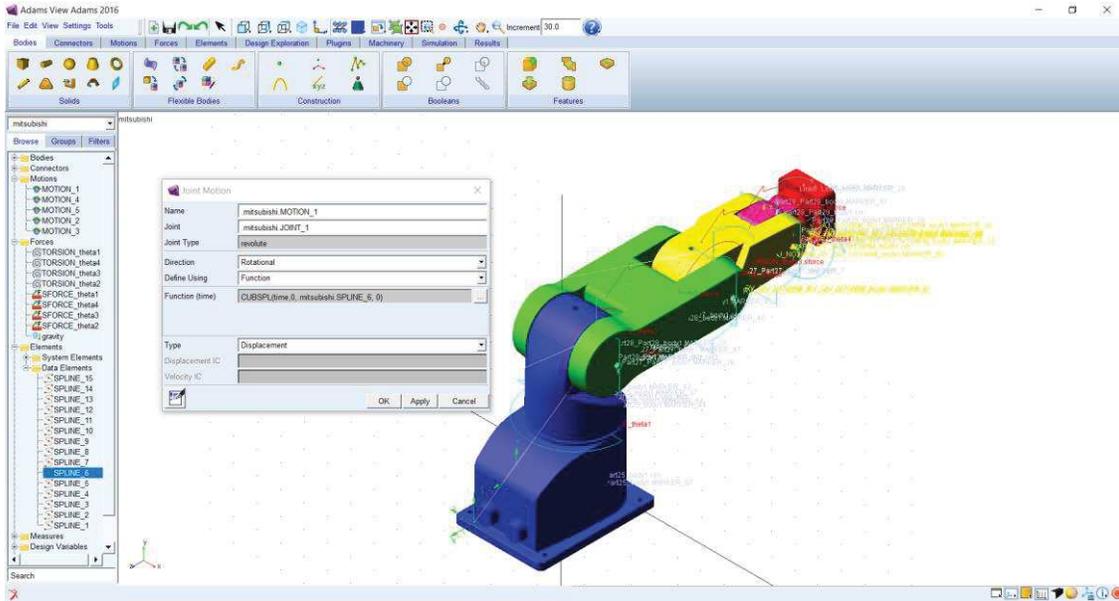


Figura 6. Uso de las Spline en AdamsView™.

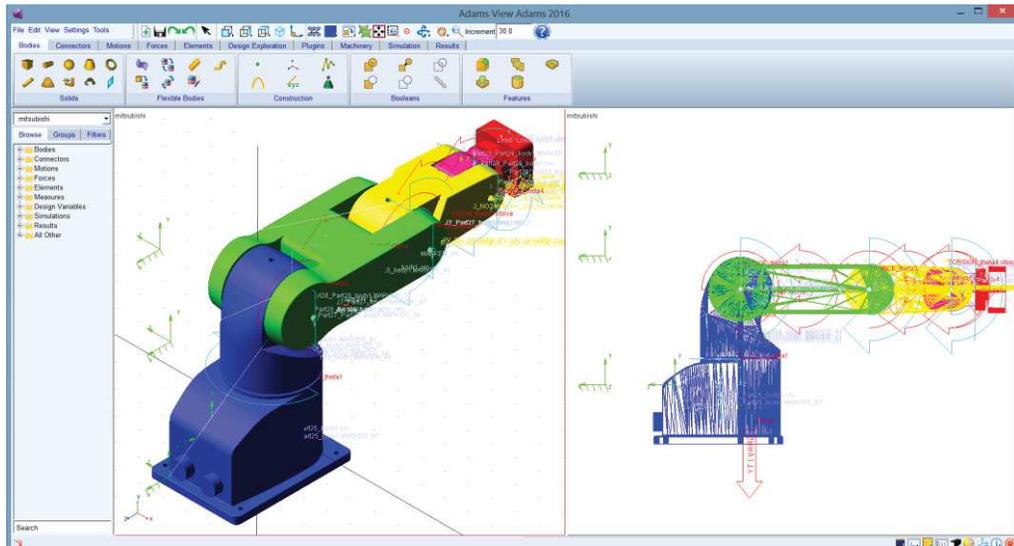
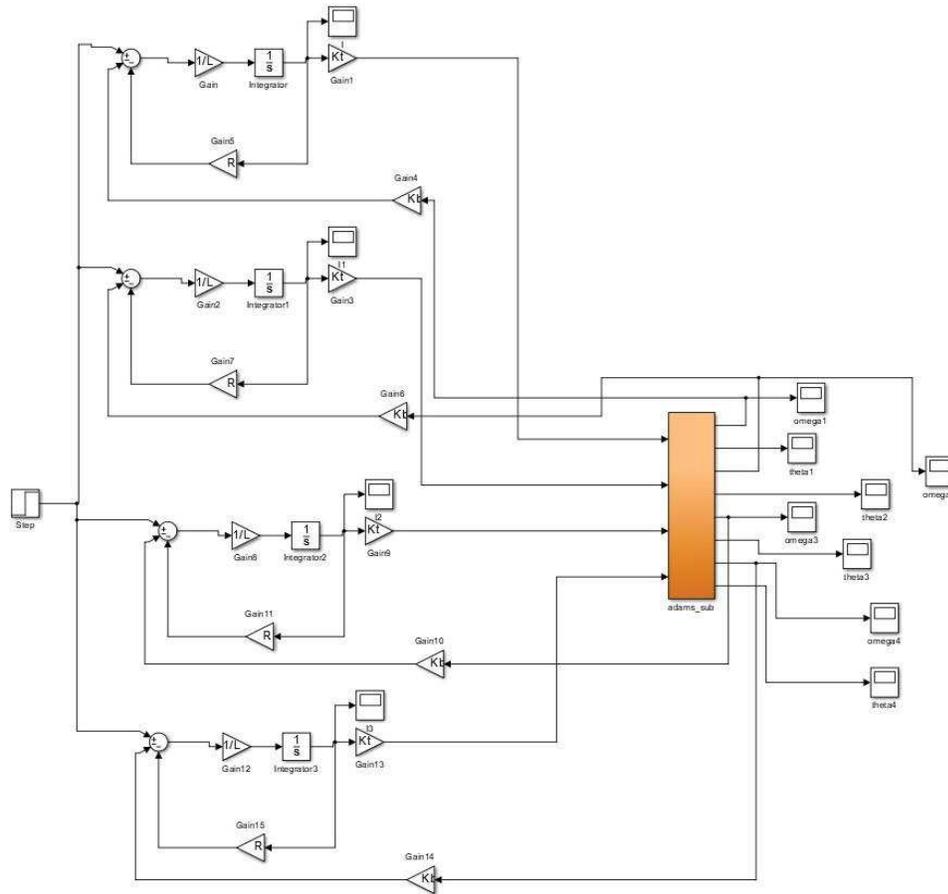


Figura 7. Punto alcanzado por el brazo manipulador en la simulación de AdamsView™.

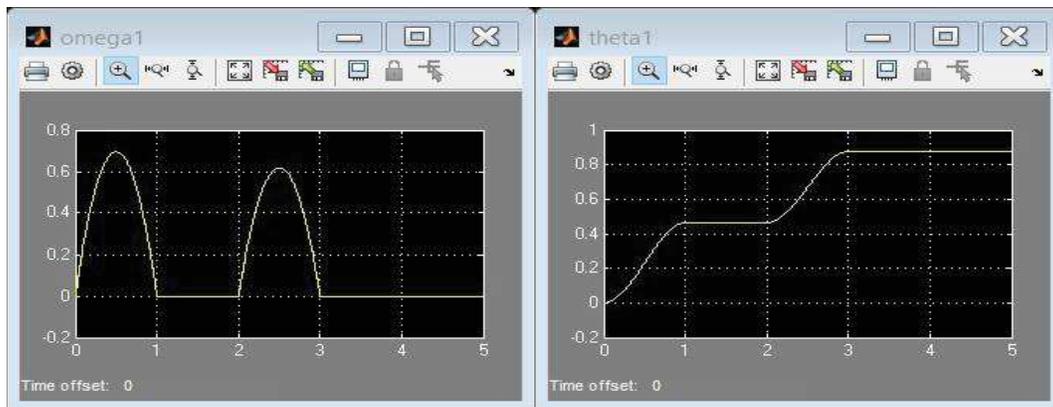


En el segundo punto los valores de inicio del control de velocidad [6] son:  $L=0.01$ ,  $R=10$ ,  $K_t=0.6$ ,  $K_b=0.002$ ,  $J=1.22e-5$ ,  $c=0.0001$  y  $K_p=0.1$ , los cuales se utilizaron para la simulación en SimuLink de MatLab como se muestra en la figura 6.



**Figura 8. Control de velocidad en Simulink para cuatro articulaciones del brazo manipulador.**

Los resultados en MatLab de la velocidad angular y la posición angular en la articulación 1, son mostrados en la figura 9.



**Figura 9. Velocidad angular (omega1) y posición angular (theta1) en la articulación 1 del brazo manipulador obtenidos en la simulación en MatLab.**

Los resultados de la simulación en Adams se muestran en la figura 10:

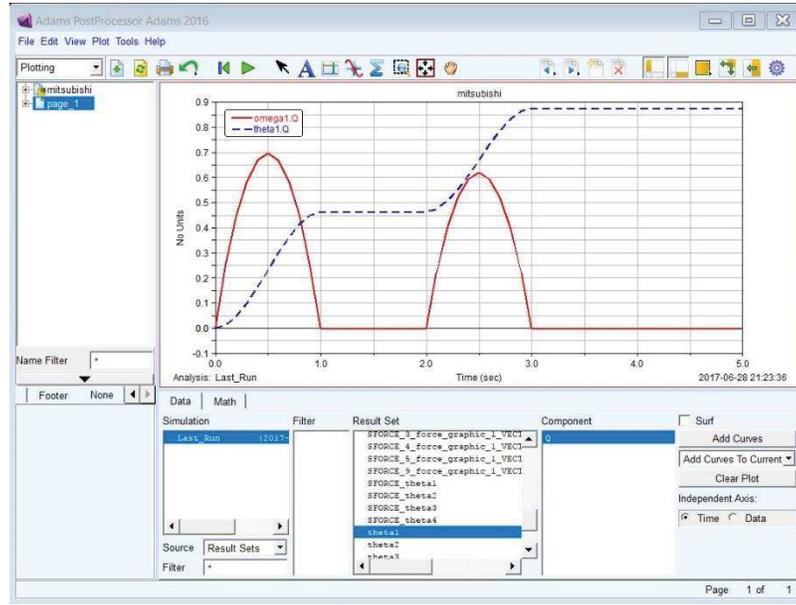


Figura 10. Posición y velocidad angular en la articulación 1 del brazo manipulador en Adams.

Como se puede observar los resultados obtenidos son los mismos tanto en MatLab como en Adams.

#### 4. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos por los Algoritmos genéticos permiten determinar los ángulos óptimos para alcanzar los puntos propuestos y de esta forma que el manipulador siga una trayectoria.

En la cosimulación de AdamsView™ con MatLab se observó que los resultados son los mismos. Los ángulos en las articulaciones son los parámetros que deben permanecer restringidos y las velocidades y aceleraciones del manipulador pueden variar en la simulación. Con éstos se determina que es posible seguir la trayectoria propuesta.

Con lo anterior expuesto se comprueba que se hizo de forma correcta la colocación de las fuerzas en los eslabones. En AdamsView™ las fuerzas se colocan en las juntas rotacionales que están en los eslabones del brazo manipulador debido a que actúan como los motores de AC en el mecanismo.

#### 5. Conclusión

El uso de los algoritmos genéticos simplifica mucho el cálculo de los ángulos para planificar trayectorias, ya que entrega los ángulos óptimos para llegar a la posición propuesta sin necesidad de usar la cinemática inversa del brazo manipulador.



Para el uso de los polinomios de quinto orden en AdamsView™ se tuvieron inconvenientes debido a que el orden de los ángulos a recorrer no los reconoce en el orden que se establece, para esto se realizó solo la simulación de dos puntos propuestos para resolver el problema.

Al colocar las fuerzas en las uniones de los eslabones para hacer la cosimulación de AdamsView™ con MatLab® se tiene que hacer de forma correcta ya que si no se colocan en el lugar que corresponde se mide otra cosa.

## Referencias

- [1] MITSUBISHI ELECTRIC. Robots versátiles, de alto rendimiento e industriales. Recuperado de <https://mx.mitsubishielectric.com/fa/es/products/industrial-robots-melfa/vertical-type-robot/overview>. 2017.
- [2] MITSUBISHI. Mitsubishi Industrial Robot RV-1A/RV-2AJ Series, standard specifications manual (CR1-571 controller). Recuperado de <http://www.rixan.com/Portals/0/RV-1A-2AJ/1n2specs.pdf>.
- [3] Arora T., Gigras Y., Arora V. "Robotic path planning using genetic algorithm in dynamic Environment". International Journal of Computer Applications. Volumen 89. Número 11. 2014.
- [4] Martínez E., Peña C., Yime E. "Diseño óptimo de un robot paralelo con configuración delta para aplicaciones educativas". Revista Educación en Ingeniería. Número 10. Páginas 110-119. 2010.
- [5] Navarro F., Remis L., Santochi D., Lenis J., Will A., y Rodriguez S. "Programación genética y aplicaciones a robótica: Cortadora de pasto y resolución de laberintos". UNICEN, Olavarría. 2012.
- [6] Parkinson, A., Balling, R., y Hedengren, J. "Optimization methods for engineering design. Applications and theory". Brigham Young University. Páginas 2-3. 2013.
- [7] Craig J. "Robótica". PEARSON EDUCACIÓN. México. Tercera edición. Páginas 64-65. 2006.
- [8] Cajamarca J., Portilla A. Implantación de un controlador para la cinemática inversa del brazo robot Mitsubishi RV-2AJ a través de una tarjeta ARM y MatLab. 2016.
- [9] Goldberg D. E. "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning". Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Estados Unidos de América. Páginas 1-14. 1989.
- [10] Universidad de Michigan (UMICH). DC Motor Speed: Simulink Modeling. Recuperado de <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorSpeed&section=SimulinkModeling>.



# Simulación y evaluación de un modelo de crecimiento del cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.)

Mancilla Morales José Arturo, Bravo Hernández Faustino.

Instituto Tecnológico de Tecamatlán

## Resumen

*La modelación matemática aplicada a los cultivos permite elegir distintos ambientes de simulación y analizar la respuesta en el tiempo de diversas variaciones, para así estimar, predecir y potencializar el crecimiento de un cultivo en una región, sin la necesidad de esperar un ciclo de cultivo. Para esto es necesario contar con datos del clima y datos del cultivo, así como contar con valores de los parámetros del modelo que ajusten las simulaciones con las mediciones tomadas en los cultivos y aunque estos pueden ser tomados de la literatura no siempre se logra el ajuste esperado, por lo que estos deben ser calculados. Con base a lo anterior el objetivo de este trabajo fue realizar la simulación y validación del modelo VegSyst. Para esto, se realizaron las simulaciones del modelo con los datos del clima y del cultivo. Para determinar los parámetros más sensibles se aplicó el análisis de sensibilidad. Para encontrar los parámetros que ajustan las simulaciones y mediciones se utilizó identificación paramétrica y para determinar que eran los correctos se utilizó análisis de incertidumbre. Se encontró en las simulaciones que cuando se utilizan parámetros tomados de la literatura, estas no se ajustan a las mediciones y por lo tanto es necesario encontrar el valor de ellos mediante técnicas matemáticas. Se puede afirmar que con las técnicas empleadas en este trabajo se encontraron los parámetros que hacen que las simulaciones se ajusten a las mediciones.*

**Palabras clave:** Simulación, pepino, modelo matemático, Matlab, producción.

## 1. Introducción

La agricultura intensiva pretende obtener la máxima producción con la menor explotación posible de los recursos naturales tratando de mantener un equilibrio, para lo cual se recurre a una serie de técnicas con el objetivo de mejorar la producción [1].

Dentro de estas técnicas están el uso y aplicación de dispositivos electrónicos para monitorear las variables climáticas a las que está sometido un cultivo, ya que estas son las que pueden explicar las tasas de crecimiento en la planta. Esto no sería posible si no se contará con modelos matemáticos dinámicos que expliquen el cambio de estas variables con respecto al tiempo [2].

Los modelos dinámicos que permiten predecir de manera correcta el crecimiento de los cultivos son aquellos que consideran que la planta se desarrolla en un ambiente protegido, como son los invernaderos [3].

El objetivo de los invernaderos es obtener el más alto rendimiento, pues el cultivo se aísla de las condiciones naturales, mediante algunas técnicas de climatización (calefacción, iluminación, humedad, radiación, etc) y técnicas de manejo de cultivo (fertirrigación, hidroponía, sustratos, plagas, enfermedades y cuidados) para rentabilizar al máximo la ocupación del terreno y los recursos naturales de la zona [4].

En México, la construcción de invernaderos tiene un constante y acelerado crecimiento. En 1980 se reportaron 300 ha [5] y para 2012 se contabilizaron 12540 ha, la mayoría clasificados de baja



tecnología. En estos últimos el 70% produce jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), 16% chile (*Capsicum annum* L.), 10% pepino (*Cucumis sativus* L.) y en 4% papaya (carica papaya), fresa (*fragaria vesca*), flores y plantas aromáticas [6].

En esta investigación se estudia el cultivo de pepino, ya que es de gran importancia económica, ya que tiene una gran demanda en el mercado local e internacional ya sea fresco o procesado. La media nacional de producción se ubica en 36 T/ha [7], por lo que es un cultivo de gran potencial para ser estudiado mediante simulación.

Actualmente la producción de este cultivo es para el mercado local y es surtido por pequeños productores que aprovechan un período donde no se siembra, es decir lo usan como un cultivo alternativo. El crecimiento de la planta es afectado por distintos factores, como son la temperatura, la humedad, radiación, suelo, manejo, plagas, enfermedades y nutrición [8].

Estos factores pueden ser estudiados al igual que los sistemas mecatrónicos mediante simulación y determinar cómo influyen en el crecimiento de la planta. En la simulación de cultivos existen tres tipos de modelos, empíricos, teleonómicos y mecanicistas. Los primeros son regresiones lineales, en donde no se tiene explicación lo que paso en el cultivo durante el tiempo. Los segundos son similares a los empíricos, pero tratan de dar explicación de su efecto en los cultivos y los terceros son expresiones matemáticas que dan explicación en el tiempo del crecimiento de los sistemas durante el tiempo, generalmente son expresados en ecuaciones diferenciales o en diferencias [2].

Por lo que el objetivo de esta investigación fue predecir el crecimiento de la planta de pepino mediante simulación dinámica.

## 2. Materiales y métodos

Esta investigación se llevó a cabo dentro del Instituto Tecnológico de Tecamatlán, en el área de invernaderos, ubicado en Carretera Palomas-Tlapa km 19.5 en Tecamatlán, Puebla, ubicado en las coordenadas 17° 54' y 18° 08' de latitud y 98° 14' y 98° 24' de longitud a una altitud de 900 msnm [9].

Las macetas donde se depositaron las plantas fue en bolas de plástico de dimensiones de 40cm x 40 cm, en donde se agregó tezontle, previamente lavado para tener un sustrato inerte. Después se depositaron las semillas de pepino, y de acuerdo a las etapas fenológicas se realizaron los cuidados correspondientes, como podas, fumigación, fertilización y tutoreo (Figura 1).



Figura 1. Preparación del cultivo

### 2.1 Modelo matemático

El modelo matemático que se utilizó en este trabajo es conocido como “VegSyst”, el cual fue desarrollado para simular la producción de biomasa del cultivo ( $DMP_i$ ), Nitrógeno en la planta ( $N_i$ ) y evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ). Este modelo se puede adaptar a las diferentes fechas de siembra,



así como diferentes prácticas en el invernadero. También se asume que los cultivos no tienen agua o limitaciones de nutrientes [10, 11].

Las entradas del modelo son datos de temperatura máxima y mínima, humedad relativa máxima y mínima, y radiación fotosintéticamente activa diaria (PAR).

El modelo requiere de una ecuación para calcular la Acumulación de Tiempo Térmico  $CTT_i$ , mediante el método de triangulación de Zalom, el cual depende si las temperaturas presentadas en el cultivo están por arriba y/o abajo del umbral de temperatura óptima para el cultivo (Ecuación 1). De acuerdo a SIAP (2014) la temperatura que favorece el crecimiento del pepino es de 15° C de temperatura mínima ( $T_{low}$ ) a 25° C de temperatura máxima ( $T_{up}$ ), mientras que las temperaturas que se presentan en el municipio de estudio son mayores a las recomendadas.

$$CTT_i = \frac{\left(\frac{6(T_{max} - T_{low})^2}{T_{max} - T_{min}}\right) - \left(\frac{6(T_{max} - T_{up})^2}{T_{max} - T_{min}}\right)}{12} \quad (1)$$

Considerando la ecuación 1, la estructura que presenta el modelo VegSyst se tienen en las ecuaciones 2 a 16 [10, 11]. Para calcular el Tiempo Térmico Relativo ( $RTT_1$ ) se tiene la ecuación 2 y 3, la primera que considera desde el trasplante hasta cuando se presenta la máxima radiación PAR y la segunda desde el máximo PAR, hasta la madurez del cultivo.

$$RTT_1 = \frac{CTT_i}{CTT_f} \quad (2)$$

$$RTT_1 = \frac{CTT_i - CTT_f}{CTT_{mat} - CTT_f} \quad (3)$$

Para calcular la fracción de PAR que requiere la planta en los dos periodos mencionados se tiene la ecuación 4 y 5, para lo cual necesita de coeficientes de ajuste expresados mediante la ecuación 6 y 7.

$$f_{i-PAR} = f_0 + \left[ \frac{f_f - f_0}{1 + B_1 \exp(-\alpha_1 RTT_1)} \right] \quad (4)$$

$$f_{i-PAR} = f_f + \left[ \frac{f_f - f_{mat}}{1 + B_2 \exp(-\alpha_1 RTT_2)} \right] \quad (5)$$

$$B_1 = \frac{1}{\exp(-\alpha_1 RTT_{0.5})} \quad (6)$$

$$B_2 = \frac{1}{\exp(-\alpha_2 RTT_{0.5})} \quad (7)$$

Para calcular Materia seca de la planta ( $DMP_i$ ) se tiene la ecuación 8, mientras que en la 9 para determinar el contenido de nitrógeno en la planta.

$$DMP_i = PAR_i RUE \quad (8)$$

$$\%N_i = a DMP_i^b \quad (9)$$

Para determinar la evapotranspiración en el cultivo se tienen las ecuaciones 10 a la 13.



$$kc_i = kc_{ini} + (kc_{max} - kc_{ini}) \left( \frac{f_{i-SR}}{f_{f-SR}} \right) \quad (10)$$

$$kc_i = kc_{end} + (kc_{max} - kc_{end}) \left( \frac{f_{i-SR} - f_{mat-SR}}{f_{f-SR} - f_{mat-SR}} \right) \quad (11)$$

$$f_{i-SR} = 1 - \exp \left[ \frac{\ln(1 - f_{i-PAR})}{1.4} \right] \quad (12)$$

$$ET_c = kc ET_0 \quad (13)$$

Donde:

$f_{i-PAR}$ : Fracción interceptada de la radiación fotosintéticamente activa.

$DMP_i$ : Producción de materia seca ( $g\ m^{-2}$ ).

$N_i$ : Contenido de Nitrógeno del cultivo (%).

$ET_c$ : Evapotranspiración del cultivo (mm).

$CTT_i$ : Acumulación de tiempo térmico ( $^{\circ}D$ ).

$PAR_i$ : Radiación fotosintéticamente activa (MJ/día).

$T_{max}$ : Temperatura máxima ( $^{\circ}C$ ).

$T_{min}$ : Temperatura mínima ( $^{\circ}C$ ).

$CTT_f$ : Acumulación de tiempo térmico en la máxima intercepción de PAR ( $^{\circ}D$ ).

$CTT_{mat}$ : Acumulación de tiempo térmico en la madurez del cultivo ( $^{\circ}D$ ).

$\alpha_1$ : Coeficiente de forma.

$\alpha_2$ : Coeficiente de forma.

$RTT_{05}$ : Tiempo térmico relativo.

$f_f$ : Máxima fracción interceptada de PAR.

$f_0$ : Fracción inicial de PAR.

$f_{mat}$ : Fracción de PAR en la madurez del cultivo.

$RUE$ : Uso eficiente de radiación ( $g/MJ\ PAR$ ).

$a$ : Factor de calibración.

$b$ : Factor de calibración.

$kc_{ini}$ : Coeficiente inicial del cultivo.

$kc_{end}$ : Coeficiente final del cultivo.

$kc_{max}$ : Coeficiente máximo del cultivo.

$f_{f-SR}$ : Máxima fracción interceptada de radiación.

$f_{mat-SR}$ : Fracción de radiación solar interceptada en la madurez del cultivo.

$ET_0$ : Evapotranspiración de referencia (mm).

Para simular la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) se utilizó la ecuación propuesta por la FAO a partir del método de Penman - Monteith [12, 13].

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (14)$$

Donde:

$R_n$ : Radiación neta en la superficie del cultivo.

$G$ : Densidad de calor del suelo.

$T$ : Temperatura del aire a 2m de altura.  
 $U_2$ : Velocidad del viento a 2m de altura.  
 $e_s$ : Saturación de presión de vapor.  
 $e_a$ : Presión real de vapor.  
 $\Delta$ : Pendiente de la curva de presión de vapor.  
 $\gamma$ : Constante psicométrica.  
 $Ra$ : Radiación extraterrestre.  
 $T_{mean}$ : Temperatura promedio.  
 $T_{max}$ : Temperatura máxima en el invernadero.  
 $T_{min}$ : Temperatura mínima en el invernadero.

## 2.2 Datos del clima y del cultivo.

Para tomar los datos climáticos necesarios para la simulación del modelo, se utilizó una tarjeta Arduino UNO en la cual se le incorporaron: a) sensor de temperatura y humedad DTH 22 del fabricante Aosong Electronics Co; b) sensor de radiación PAR de la marca Spectrum Technologies (Figura 2).

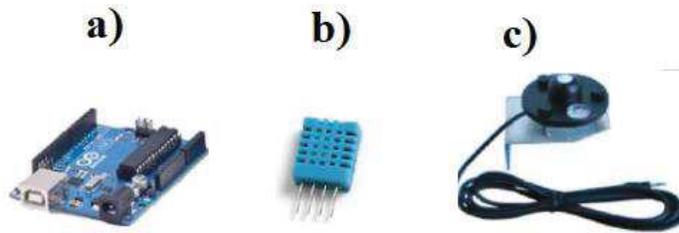


Figura 2. Electrónica para medir las variables climáticas.

Los datos del clima se registraron cada 14 días a partir de la fecha de trasplante. Las plantas se cortaron y se llevaron a una estufa de secado, dejándolas 48 horas a una temperatura constante de 75°C. Para la obtención de nitrógeno, se tomaron muestras de materia seca para analizarlas por el método de kjendhal

## 2.3 Calibración o estimación de parámetros

Existen modelos matemáticos complicados y por consiguiente grandes en parámetros, en donde asumimos que los parámetros son dados o conocidos, pero algunos o todos no son conocidos, por lo que es necesario determinarlos [15]. Una de las formas más conocida como estimación de parámetros o calibración. A veces también se le llama curva de ajuste, por lo que la calibración del modelo intenta adaptarse a dicha curva lo más estrechamente posible.

Las aplicaciones de la calibración son [16]:

- Modificación de valores de algunos parámetros del modelo para un mejor ajuste.
- Estiman los parámetros en los que el modelo es más sensible
- Definir un problema de optimización.
- Selección de un conjunto de parámetros a ser estimados.



El método de calibración que se utilizó en este trabajo es el de mínimos cuadrados no lineales (*Levenberg-Marquardt*). Este algoritmo es un proceso iterativo de convergencia, en donde se busca una función a minimizar, el cual permite identificar los valores de los parámetros del modelo [15].

La función a minimizar se describe como:  $f(x) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m r_j^2(x)$

Donde  $x = (x_1 \dots x_n)$   $r_j$  residuales  $m \geq n$ ;  $r(x) = (r_1(x_1) \dots r_n(x_m))$

$$\Rightarrow f(x) = \frac{1}{2} \|r(x)\|^2 \quad (15)$$

La matriz Jacobiana tiene la siguiente estructura:

$$J(x) = \frac{\partial r_j}{\partial x_i}, \quad 1 \leq j \leq m, \quad 1 \leq i \leq n \quad (16)$$

$$\nabla f(x) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m r_j(x) \nabla r_j(x) = J(x)^T r(x) \quad (17)$$

$$\nabla^2 f(x) = J(x)^T J(x) + \sum_{j=1}^m r_j(x) \nabla^2 r_j(x) \quad (18)$$

La simulación del modelo, gráficas de las variables climáticas y la calibración se realizó en el lenguaje de programación Matlab®.

### 3. Resultados

Para realizar las simulaciones del modelo, fue necesario tomar datos del clima dentro del invernadero. Los datos de temperatura, humedad y PAR, se muestran en las Figuras 3, 4 y 5, respectivamente.

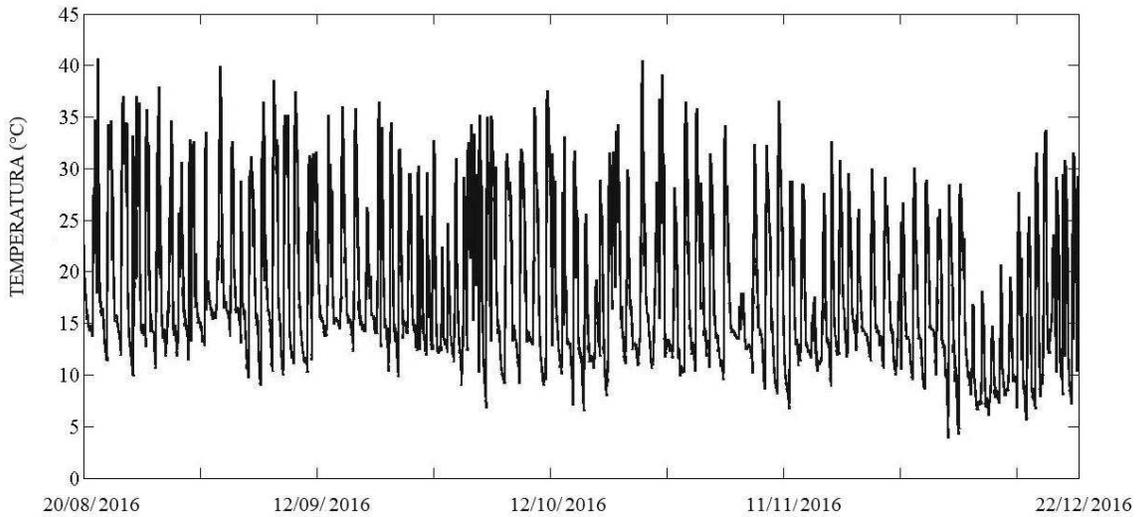


Figura 3. Datos de temperatura.

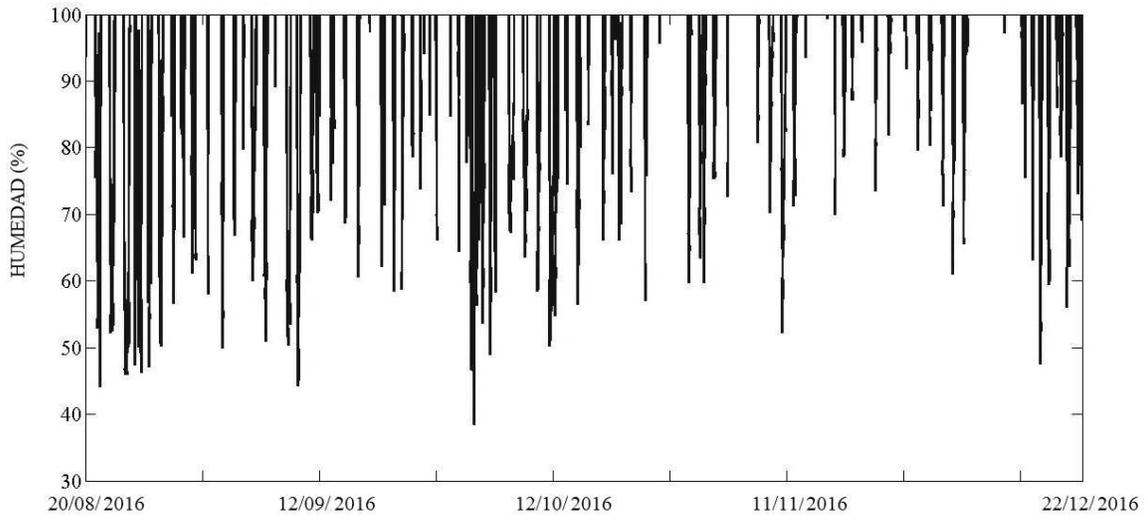


Figura 4. Datos de humedad relativa.

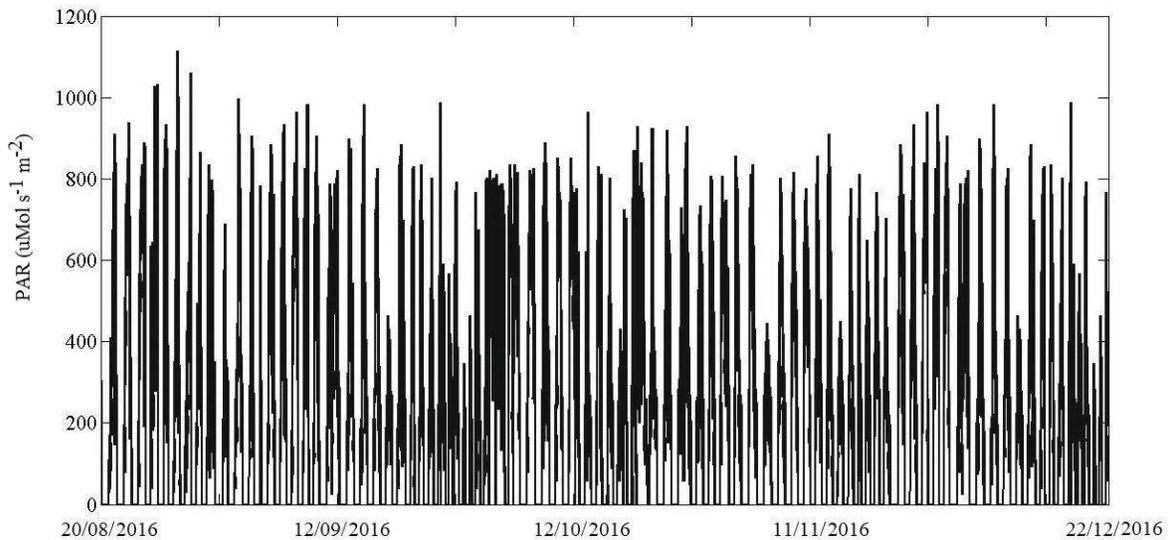


Figura 5. Datos de radiación PAR.

Los datos de temperatura, humedad y radiación sirvieron como entradas del modelo matemático y para las simulaciones se utilizaron los valores de los parámetros reportados por los autores del modelo [10, 11, 12]. Los resultados de la comparación de las simulaciones y las mediciones se muestran en la figura 6 y 7, para materia seca y contenido de nitrógeno en la planta.

Se puede observar en las Figuras 7 y 8, que las simulaciones no corresponden a las mediciones, debido a que se utilizaron parámetros de condiciones diferentes a donde se realizó el experimento. Por lo cual se realizó la calibración del modelo. Los valores nominales de los parámetros de las condiciones donde los autores del modelo realizaron el experimento se muestra en la Tabla 1. Estos valores durante la calibración se modificaron al 10% arriba y debajo de los valores propuestos.

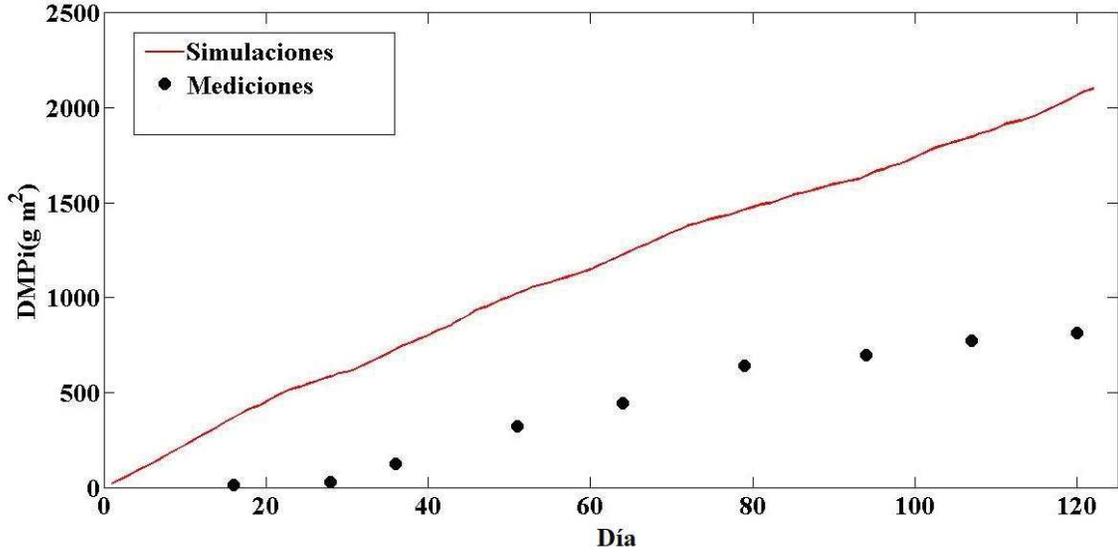


Figura 6. Simulaciones y mediciones de Materia seca.

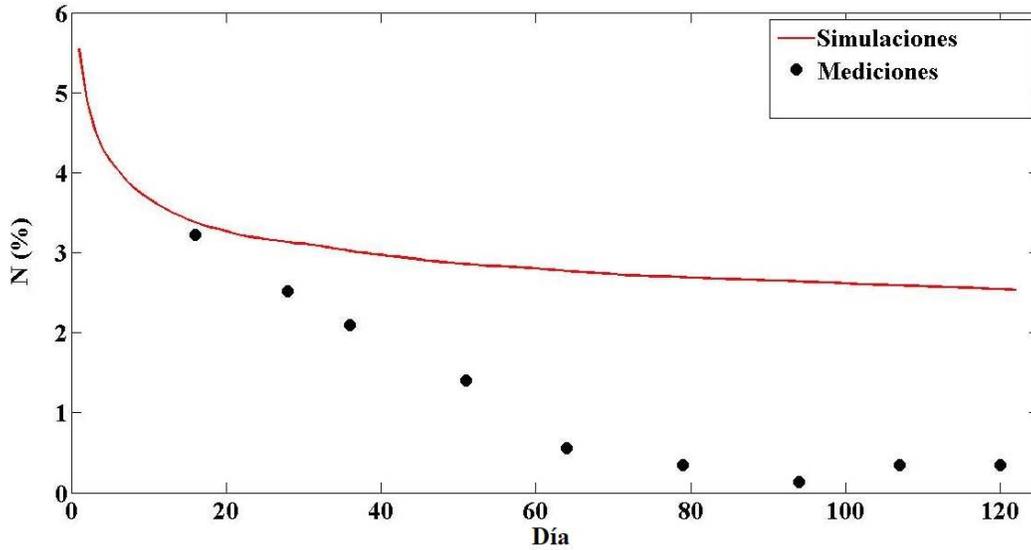


Figura 7. Simulaciones y mediciones de contenido de nitrógeno en la planta.

Los valores identificados en la calibración del modelo se simularon en el modelo matemático, encontrando un ajuste entre las simulaciones y mediciones (Figura 9 y 10).

Tabla 1. Calibración del modelo.

Parámetros	Valores nominales	Max 10%	Min 10%	Valores identificados
<i>RUE</i>	4.01	4.41	3.61	4.2
<i>a</i>	17.86	19.65	16.07	18.7
<i>b</i>	-0.71	-0.78	-0.64	-0.75
<i>f<sub>0</sub></i>	0.01	0.01	0.01	0.01
<i>f<sub>f</sub></i>	0.72	0.79	0.65	0.77



$f_{f-SR}$ :	0.53	0.58	0.48	0.528
$f_{mat}$	0.90	0.98	0.81	0.97
$RTT_{05}$	0.54	0.59	0.49	0.59
$\alpha_1$ :	11.00	12.10	9.90	11

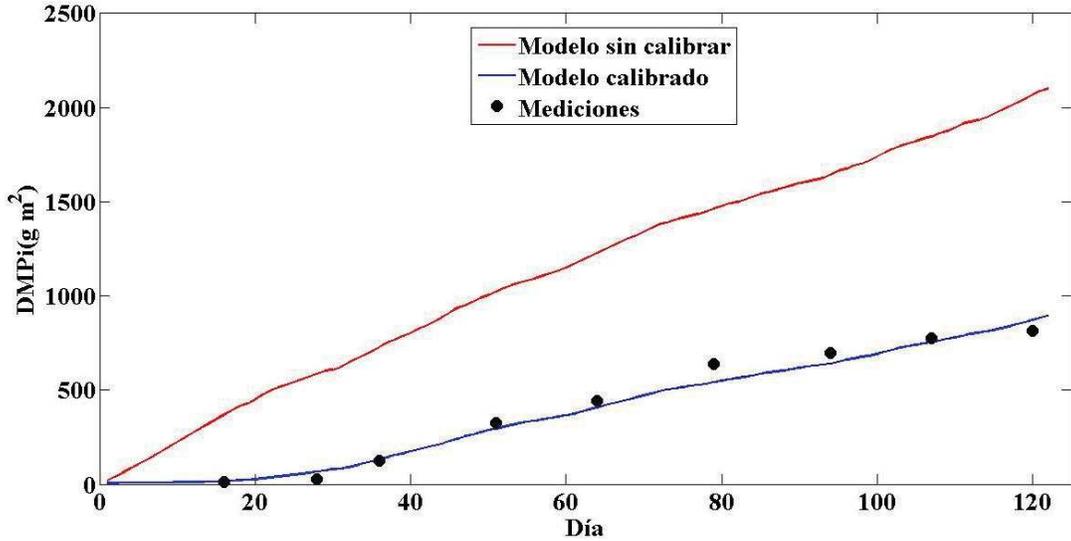


Figura 8. Simulaciones antes y después de la calibración para materia seca.

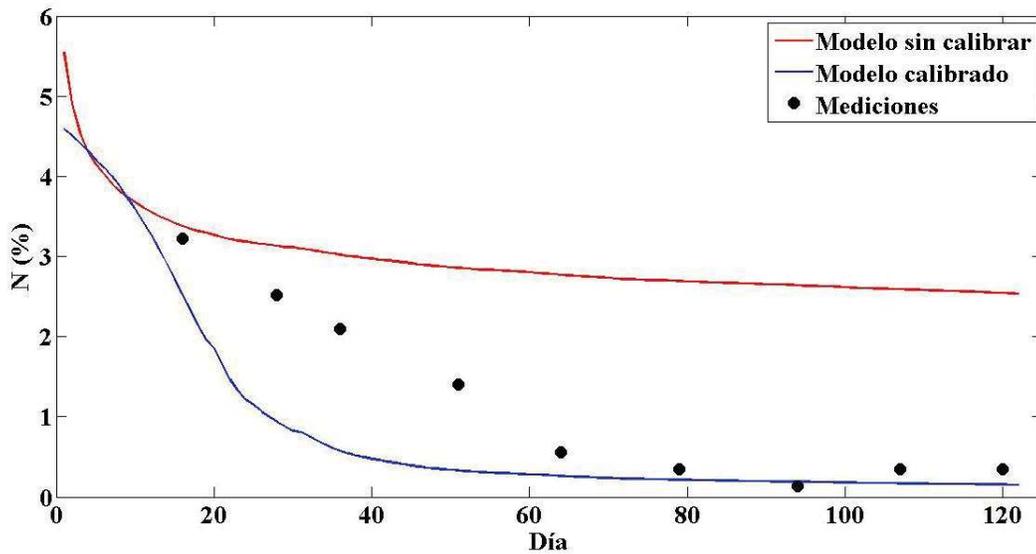


Figura 9. Simulaciones antes y después de la calibración para materia seca.

Para determinar que las simulaciones corresponden a las mediciones se graficaron cada uno de los datos, los cuales se muestran en la figura 10 y 11 respectivamente para cada una de las variables.

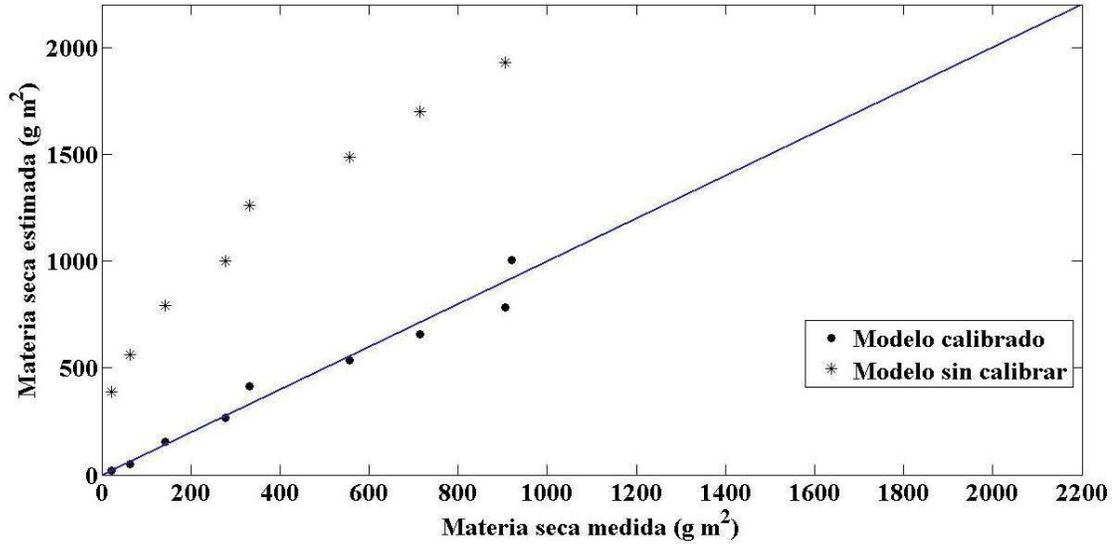


Figura 10. Comparación de las simulaciones del modelo calibrado y sin calibrar.

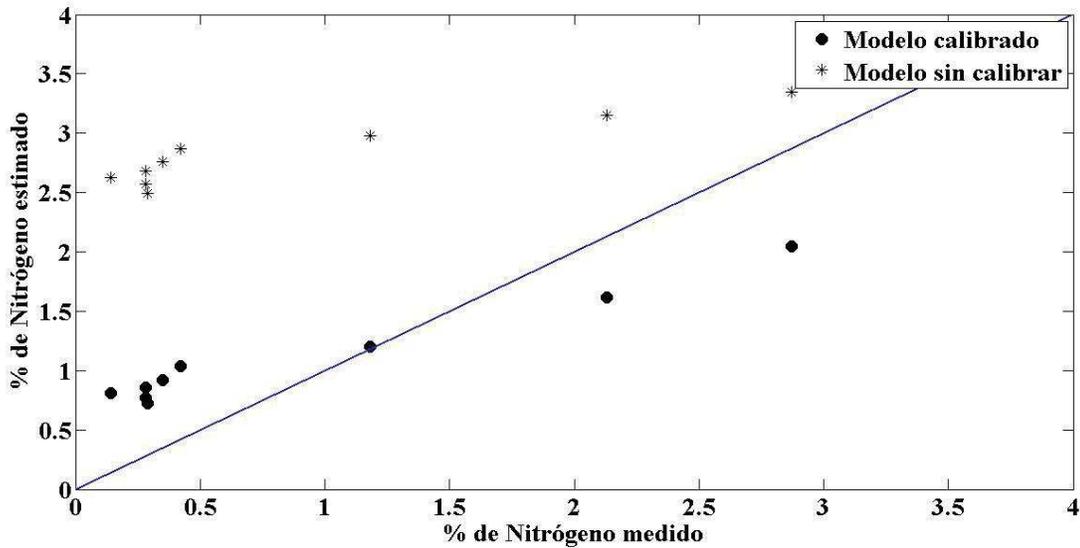


Figura 11. Simulaciones del modelo calibrado y sin calibrar, con respecto a las mediciones de nitrógeno en la planta.

Para determinar de forma cuantitativa los resultados anteriores se calculó el coeficiente R<sup>2</sup>, Error cuadrático medio (MSE), Raíz del error cuadrático medio (RMSE), Media del error absoluto (MAE), Promedio de la diferencia entre los datos medidos y calculados (BIAS), Coeficiente de variación (CV) y Varianza (VAR). Estos resultados se muestran en la Tabla 2.

Se puede observar en los cálculos estadísticos que estos mejoraron notablemente después de la calibración, por lo cual se afirma que después de aplicar estas técnicas se encontraron los parámetros para las condiciones agroclimáticas de la región.



**Tabla 2. Valores estadísticos antes y después de la calibración del modelo.**

	DMP		Ni	
	A. Cal	D. Cal	A. Cal	D. Cal
<b>R<sup>2</sup></b>	0.97	0.9733	0.95	0.85
<b>CME</b>	698110.00	2599.8	3.3	0.73
<b>RCME</b>	835.53	50.98	1.81	0.85
<b>MAE</b>	792.12	40.74	1.62	0.63
<b>bias</b>	792.12	12.47	1.62	0.62
<b>CV</b>	0.52	0.74	0.16	1.29
<b>Var</b>	344770.00	83522	0.24	0.59

A. Cal: antes de la calibración, D. Cal: después de la calibración.

## 4. Conclusiones

Los resultados mostrados en esta investigación permitieron demostrar que las simulaciones difieren a las mediciones si no se cuentan con los valores de los parámetros agroclimáticos de la zona.

La técnica de mínimos cuadrados no lineales permitió encontrar los valores de los parámetros que permiten ajustar las simulaciones y mediciones. Los datos estadísticos de las simulaciones sirvieron para demostrar que si existió un mejor ajuste después de la calibración, por lo cual se afirma que los parámetros elegidos fueron los correctos.

## Referencias

- [1] [1] Gómez, S. ¿Nueva ruralidad? Un aporte al debate. *Rev. Estudios, Sociedades y Agricultura*, 17(1): 5-32. 2013.
- [2] López Cruz, I. L., Rojano-Aguilar, A., Salazar-Moreno, R., & López-López, R. Global sensitivity analysis of crop growth sucros model applied to husk tomato. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(3): 279-288. 2014.
- [3] Mancilla M. J. A. Desarrollo de un simulador del crecimiento de un cultivo de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) con aplicación de Nitrógeno para invernaderos de Aquixtla, Puebla. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados. 218 p. 2017.
- [4] López C. I., Ramírez A., Rojano A. Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: Trascendiendo la contemplación dinámica de cultivos. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*. 11 (2). Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo México, pp. 257-267. 2005.
- [5] García N. V., Van der Valk O., Elings A. *Mexican Protected horticulture*. Wageningen, Netherlands. 108 p. 2011.
- [6] SAGARPA. Agricultura protegida. Disponible en: <http://2006-2012.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura-Protegida2012.aspx#>. Consultado: Diciembre 2016
- [7] SAGARPA. Evaluación de alternativas y potencial de comercialización para los productos y especies de unidades productivas con escala mínima rentable del Estado de Puebla. Estudio Estratégico. SAGARPA, Gobierno del Estado de Puebla. Puebla, Méx. 46 p. 2016
- [8] Ortega M., L., J Ocampo M., E. Sandoval C., C. Martínez V., A. Huerta P. y J. Jaramillo V. Caracterización y funcionalidad de invernaderos en Chignahuapan, Puebla. *Revista Bio Ciencias*. 261-267. 2014.
- [9] INEGI (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. Puebla. México. INEGI. 2009.



- [10] Gallardo M., Giménez C., Martínez C., Stöckle C. O. Thompson R. B., Granados M.R. Evaluation of the VegSyst model with muskmelon to simulate crop growth, nitrogen uptake and evapotranspiration. *Agricultural Water Management* 101: 107– 117. 2011.
- [11] Gallardo M., Thompson R.B., Giménez C., Padilla F.M., Stöckle C.O. Prototype decision support system based on the VegSyst simulation model to calculate crop N and water requirements for tomato under plastic cover. *Irrig. Sci.* 32, 237–253. 2014.
- [12] Giménez C., Gallardo M., Martínez C., Stöckle C. O., Thompson R. B., Granados M. R. VegSyst, a simulation model of daily crop growth, nitrogen uptake and evapotranspiration for pepper crops for use in an on farm decision support system. 31(3): 465-477. 2013.
- [13] Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. FAO, Rome, Italy. 15 p. 1998.
- [14] FAO. Allen R., Pereira L., Raes D., Smith M. Evapotranspiración del cultivo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. Roma, I. 244 p. 2006
- [15] Van Straten G. What can Systems and Control Theory do for Agricultural Science? *Automatika* 49: 105-117. 2008.
- [16] Soltani A y Sinclair T. Modeling physiology of crop development, grow and yield. *Library of Congress Cataloging-in-Publication Data*. 322. 2012.



# Viscosímetro Rotacional de Control Digital

Pérez Chimal Rosa Janette, Cabrera Esteves Juan Ricardo, Luna Puente Rafael, Hernández Mosqueda Carlos, Prieto Figueroa Araceli.

Universidad Tecnológica de Salamanca,  
Departamento de Mecatrónica, Salamanca, Gto. México.

## Resumen

*El cálculo y medición de la viscosidad es de suma importancia para la mecánica de fluidos debido a la gran cantidad de aplicaciones que tiene. La viscosidad en la actualidad es medida para el análisis de calidad de diferentes fluidos como petróleo, lácteo, jabones, medicamentos, etc. La elaboración de este viscosímetro tiene como objetivo medir la viscosidad del líquido que se desea analizar, esta medida nos arroja información de las características físicas del fluido y a su vez del comportamiento del mismo en distintos ambientes. El viscosímetro que aquí se presenta se logra gracias al análisis rotacional de un motor y al control digital del mismo por medio de la programación de un microcontrolador PIC el cual da como resultado un producto fiable y manejable para el análisis y medición de la viscosidad en diversos fluidos (agua, aceite y yogurt). En trabajos futuros se busca ampliar la cantidad de elementos a medir de forma reprogramable y agregar algunas características físicas del fluido como, peso, temperatura, densidad, y algunas otras características del aparato como, almacenamiento de datos y monitoreo a distancia por medio de aplicaciones en Smartphone. La finalidad es que mediante la adquisición y monitoreo de estos datos, se puedan caracterizar diferentes tipos de fluidos como, aceites y su comportamiento al ser sometido a condiciones específicas como cambios de temperatura, esto para pronosticar el comportamiento de los mismos.*

**Palabras clave:** Viscosidad, Mecánica de fluidos, Automatización.

## 1. Introducción

Los líquidos, a diferencia de otros estados de la materia, tienen la propiedad de fluir, las moléculas de los líquidos y gases se desplazan fácilmente, lo que les permite a su vez cambiar de forma y adaptarse, en espacio, al medio en donde se encuentran. La reología es la ciencia que se encarga de estudiar las propiedades viscosas de los fluidos [1].

Existen diversas formas de medir la viscosidad de un fluido, diversos aparatos tanto análogos como digitales pueden darnos el valor de la viscosidad de un fluido, algunos de ellos son por ejemplo los de caída libre, utilizados en los inicios de análisis de viscosidad y que a la fecha se siguen utilizando por su bajo costo, aunque en algunos casos son poco confiables.

La viscosidad es una propiedad de los fluidos que tiene importancia en diversas aplicaciones industriales, una de las principales aplicaciones es en el análisis de lubricantes usados para las máquinas y diversos mecanismos. La importancia de los lubricantes radica en la relación con la fricción y desgaste que esta genera.

Existen varios aparatos para medir la viscosidad, esto depende del principio de funcionamiento o técnicas utilizadas para cada uno de ellos (viscosímetros, aparato para medir la viscosidad). Una forma es por el principio de Stokes donde con una esfera de metal se determina la velocidad que tarda la esfera en llegar al fondo del recipiente. Este tipo de viscosímetros se les llama de caída o de bola.



Viscosímetros capilares, su estructura esta hecha de tubos de vidrio de diferentes áreas, regularmente en forma de U donde por medio de niveles se puede determinar la viscosidad del líquido, y se registra el tiempo que pasa de un nivel a otro [2].

Se define viscosidad como la resistencia que ofrecen los fluidos al movimiento de sus moléculas, y es una propiedad muy distintiva de los fluidos. El estudio de la viscosidad se deriva como consecuencia del principio de Newton de la viscosidad. Donde  $\mu$  se conoce como el coeficiente de viscosidad dinámica y tiene las dimensiones ( $FtL^2$  ó  $m/Lt$ ). En general la viscosidad de los fluidos disminuye conforme se aumenta la temperatura de los mismos.  $\eta$  es conocido como el coeficiente de viscosidad el cual indica la resistencia del líquido a fluir y se determina por la relación entre el esfuerzo cortante  $\tau$  y el perfil de velocidades que se genera en el fluido Y

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

La viscosidad de un líquido se puede medir por medio de la ecuación de Stockes, esto es en base a un estudio por Stockes con una esfera de metal en relación con el empuje del líquido a la esfera. En la figura 1 se presenta uno de los viscosímetros más utilizados en sus principios, el viscosímetro de Ostwald el cual está hecho de vidrio.

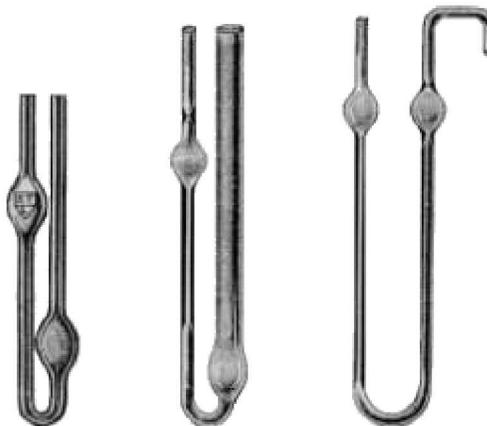


Figura 1. Viscosímetro de Ostwald (grupo selecta)

Otra forma de determinar la viscosidad es por medio de una rampa de nivel, el cual va a servir para dejar caer el fluido por un canal donde se mide también la relación de la caída y la distancia para determinar. Otro como el viscosímetro de cilindros concéntricos el cual permite calcular la viscosidad absoluta de un fluido por medio de tubos los cuales son fácil de realizar y de bajo costo, pero no ofrecen óptimos resultados.

Los viscosímetros Rotacionales se basan en el principio de la fuerza que es requerida para rotar un objeto inmerso en un fluido. Un viscosímetro rotacional digital es capaz de tomar mejores mediciones y ser controlado a través de un microcontrolador, en la actualidad y en diversas universidades se sigue estudiando la manera de medir óptimamente la viscosidad por medio de aparatos de este tipo como se muestra en la figura 2 [3].



**Figura 2. Viscosímetro rotacional de la Universidad de Cartagena**

Los viscosímetros rotacionales se basan en la fuerza requerida para rotar un cuerpo sumergido y se basa en el tamaño del aspa contenida en la muestra la cual gira a una velocidad rotacional denotada por  $\omega$ . Se sumerge en el líquido un cilindro coaxial de altura  $h$  y radio  $r$  suspendido a un alambre de torsión que produce un torque como resultado de las fuerzas de la viscosidad. Un viscosímetro rotacional instrumento para medir la viscosidad de diferentes líquidos dependiendo de la velocidad aplicada por medio de un sensor detectando las RPM (Revoluciones Por Minuto) del giro del motor para determinar la viscosidad resistencia interna de un fluido al ser deformado por un esfuerzo.

Los viscosímetros más actuales son los digitales los cuales el costo depende de sus características y fiabilidad, estos regularmente son vendidos para aplicaciones y rangos específicos de fluidos, los cuales contienen aditamentos adicionales para cada aplicación.

Actualmente el análisis de fluidos es muy utilizado en la industria y laboratorios para la realización y caracterización e fluidos. Algunas áreas como; la industria textil, alimenticia, petroquímica entre otras utilizan estos aparatos para conocer y determinar las características de fluidos como soluciones de teñido, aceites, lubricantes, solventes, etc. mismos que a su vez determinan algunos factores como la calidad de los productos a ofertar los cuales dependen directamente de las propiedades moleculares de la materia. Un viscosímetro ideal sea aquel que de mayor fidelidad y fiabilidad de los resultados en función a sus rangos de aplicación, por lo que se propone un viscosímetro el cual cumpla con estas características, las cuales deben ser específicas para cada área de aplicación pero sin tener que cambiar de viscosímetro para cada aplicación [4].

## 2. Desarrollo

El desarrollo de este proyecto está constituido en tres etapas, la etapa de sensado, la de adquisición y control, y el monitoreo, en la primera etapa se adquieren datos del sensor para poder conocer los movimientos del motor, la segunda etapa consiste en la adquisición de datos con un microcontrolador y finalmente la interfaz hombre máquina la cual se logra por medio de una pantalla LCD y un control remoto. Se utiliza una fuente regulada 12 VDC, 5VDC y fuente de 110 VAC para la alimentación del sistema, este dispositivo tiene como función alimentar el sistema general y secundario del prototipo, manteniendo como voltajes 12VDC para el control de activación de radio frecuencia, 5VDC para la alimentación del microcontrolador PIC 16F628a y el sistema de ejecución secundario de visualización de datos (LCD y Leds), 3.3VDC este voltaje se ha adaptado para manipular únicamente los pulsos detectados por el optoacoplador tipo herradura.

Es utilizado un módulo de control de RF (radio frecuencia), estableciendo un sistema de control mejorado para la activación del sistema general y la manipulación de encendido del motor 110VAC se construye un sistema de radio frecuencia con el propósito de establecer una comunicación a distancia



en la activación de los segmentos mencionados. Para realizar este control se implementa en la parte lateral derecha un módulo RF con las siguientes características:

- Alimentación: 12VDC.
- Frecuencia: 433 MHz.
- Canales: 12.
- Relevadores: 10A/120VAC.
- Medidas: 1000x80x30 mm.
- Modos: Momentáneo y Toggle.

Este trabajo es realizado con programación en C en un microcontrolador PIC, la razón por la cual se utiliza un PIC es debido a su bajo costo y a la gran cantidad de aplicaciones que se le pueden dar a este, lo que nos conlleva a, en un momento dado, reprogramar el PIC para poder ampliar las características del viscosímetro, debido a que esta es una primera etapa para el proyecto. Si se deseara utilizar un microcontrolador comercial como Arduino, este podría en un momento dado limitar las características del viscosímetro ya que tiene características más específicas debido a su integración que un PIC.

Este sistema se realiza únicamente con dos señales de control independientes mediante el manejo de los canales número 7 y 8. El canal número 7 cumple con la función de establecer un switch de encendido del motor 110VAC y de esta manera realizar la mezcla para manipulación y sensado de cada muestra. El canal número 8 cumple con la función de establecer un switch de encendido general del sistema para dar inicio al sistema instruccional de reconocimiento de fluido y viscosidad de cada muestra.

Para acondicionar un sensado de RPM (revoluciones por minuto) para el motor de 110VAC es necesario adaptar un encoder de disco de un solo segmento, el cual mantenga un pulso cada 360 grados, por tanto, se establece un diseño de adquisición de señal haciendo uso de un optoacoplador de herradura H21A3 y un arreglo de resistencias y de un transistor 2N2222 para enviar un pulso cada 360 grados y mediante una programación en C, y una LCD 16x2 visualizar los resultados de variación de RPM según el tiempo transcurrido +/- entre pulso a pulso. El encoder se sitúa entre la ranura del optoacoplador y mediante la rotación del eje del motor comparar dependiendo la muestra el tiempo de variación de pulsos.

Obteniendo la alimentación de 5VDC se obtiene el diseño mediante la programación de un microcontrolador PIC 16F628a el cual tiene como función detectar los pulsos emitidos por el optoacoplador de herradura H21A3 y mediante una serie de instrucciones el cual tiene como función dar una presentación del proyecto y mostrar resultados mediante una LCD 16x2 y tres leds de color verde, amarillo y rojo para indicar el tipo de fluido utilizado en la muestra. Dicho procedimiento cuenta con la manipulación del sistema RF mencionado con anterioridad para la ejecución de cada parte del prototipo.

Cabe mencionar que este procedimiento debe realizarse específicamente para cada fluido a analizar por medio de la programación del microcontrolador, este será caracterizado para los fluidos o el rango de fluidos que se desean para así poder precisar sus características.

La viscosidad absoluta es la propiedad de los fluidos que se caracteriza por su resistencia a fluir, debida a su rozamiento entre sus moléculas. En el sistema internacional se mide en pascales segundo pero la unidad más utilizada es el centipoise (cps) [5].

Debido al diseño de este viscosímetro se ha determinado basarse en una tabla de viscosidad establecida por las normas de la empresa ATPP, un centro de investigación que basa sus lecturas mediante equipos sofisticados de calidad, por tanto, la tabla concentra 6 tipos de muestras con su viscosidad establecida a un margen de error del 0.17% [6]. Las unidades de la viscosidad son manipuladas en centipoise (cps) lo cual, es equivalente a 1 mPaS (mili pascal segundo).



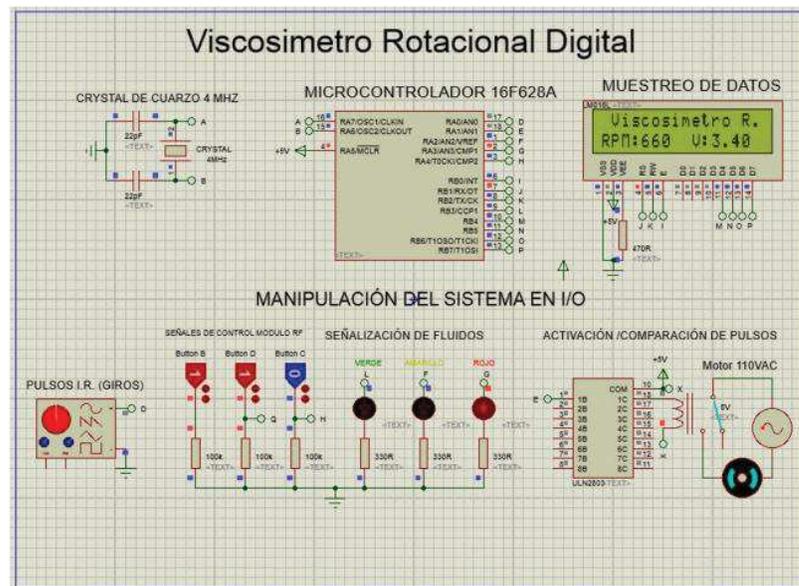
**Tabla 1. Viscosidad de algunos fluidos en base a la empresa ATPP**

Al coeficiente de viscosidad también se le llama viscosidad dinámica (o absoluta) Una unidad común es el poise, equivalente a 0.1 Pa*s La viscosidad del agua a 20°C es 1 centipoise (cps)	Fluido	Viscosidad (cps)
	Aire	0.01
	Agua	1
	Metanol	0.5
	Aceite	2.4
	Yogurt	3.2
	Crema	100

Para la adquisición de señal de pulsos del motor mediante el encoder se estableció un generador de señales usando una señal de tipo cuadrada para simular los pulsos provenientes del optoacoplador de herradura; de igual manera con el modulo RF se hace uso de un sistema de botones para simular las activaciones del canal 7 y 8.

Antes de la realización de las pruebas en el sistema en físico se procedió a implementar el sistema en un simulador el cual nos permite verificar posibles fallas del sistema y corregirlas antes de su implementación.

Haciendo uso del software de simulación se realizó la simulación electrónica del viscosímetro rotacional, la cual, consta de un microcontrolador PIC16F628a en donde se hace referencia a la programación; este dispositivo realiza un muestreo de valores de RPM y valores mediante una pantalla LCD 16x2 y tres leds de color verde, amarillo y rojo el cual se puede observar en la figura 3.



**Figura 3. Simulación/pruebas del viscosímetro**

De esta manera se verifica que todo funcione correctamente para poder pasar a la etapa de armado y pruebas del sistema.

### 3. Resultados

Realizando la adaptación del prototipo para las lecturas de viscosidad basadas en la tabla 1, se desarrolló una tabla que concentra la fórmula resultante de la comparación de tres datos preestablecidos en el sistema los cuales se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2. Viscosidad arrojada mediante el cálculo de las muestras preestablecidas**

Fluido	RPM	Viscosidad (cps)	Constante
Aire	7400	0.3	2250.50
Agua	1740	1.29	2250.50
Aceite	1200	1.87	2250.50
Yogurt	420	5.35	2250.50

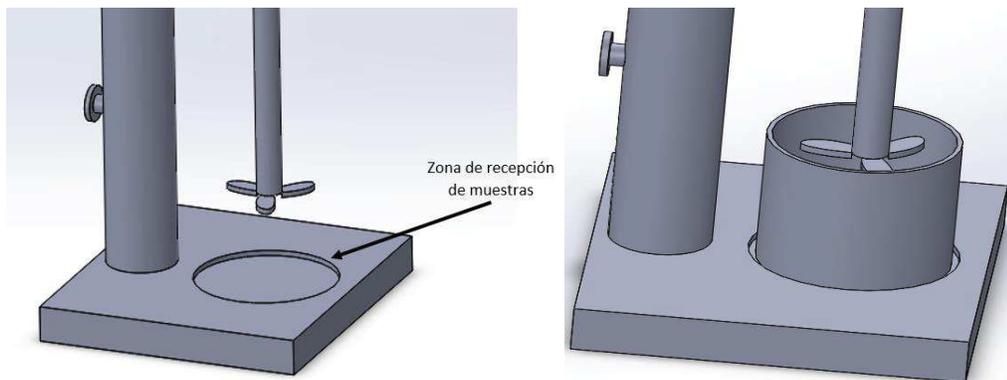
Tomando en cuenta los valores de los resultados de la tabla 2 en comparación a los de la tabla 1, podemos deducir la siguiente ecuación de referencia de la viscosidad para la programación del sistema.

$$v = \frac{2250.50}{RPM} \quad (2)$$

Con la información anterior podemos obtener la relación de las revoluciones por minuto del motor en función a la viscosidad con la constante obtenida, de esta manera se procede a la programación en C del PIC para poder realizar tanto la simulación como las pruebas pertinentes para en funcionamiento del viscosímetro.

La programación del PIC (anexo 1) nos permite, convertir la información del motor (RPM) en valor de viscosidad de los elementos y de esta manera poder decirle al usuario que líquido es el que se está colocando.

Se obtiene una estructura de ajuste telescópico con funcionamiento adecuado para las necesidades que presentar de este prototipo. Los pulsos de adquisición del optoacoplador de herradura en conjunto al encoder situado al eje del motor son adecuados ante la referencia de las muestras de los líquidos sensados, en la figura 4 se muestra el esquema de la colocación de muestras a analizar.



**Figura 4. Recepción de muestras**

El muestreo de la viscosidad en la LCD presenta un rango máximo de error +/-0.3% el cual arroja un valor similar al establecido por ATTP y otras tablas de valores ya establecidos de viscosidad lo que muestra resultados aceptables, los cuales sin embargo pueden ser mejorados.

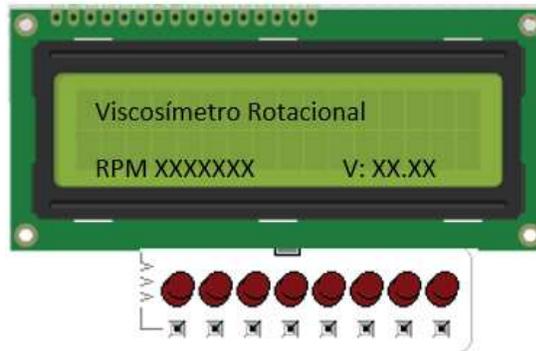


Figura 5. Resultados del análisis en pantalla

El sistema sena de manera correcta el tipo de muestra preestablecida que se pretende manipular los cuales son suficiente para muchos fluidos, sin embargo algunos elementos, en la figura 5 se muestra la pantalla con la leyenda del resultado.



Figura 6. Comienzo con tecla 7 del control

Por medio de un control remoto (figura 6) se enciende y comienza el proceso de medición de la viscosidad.



Figura 7. Vista frontal y lateral del prototipo



Obtenemos un sistema de mejora e innovación ante otros viscosímetros existentes, al implementar un control inalámbrico para la manipulación del prototipo. Se establece una mejora funcional para el reconocimiento del encoder en el rpm, con el sensor de herradura, que es de difícil adaptación en el cálculo de la viscosidad de un fluido (ver figura 7).

## 4. Conclusiones

Este proyecto sirve para la elaboración de análisis de viscosidad en fluidos con la finalidad de garantizar la realización de pruebas de viscosidad que ofrezca resultados fiables, ágiles y precisos para empresas de la región, empresas del área de alimentos, petroquímica, entre otros.

Se logró un sistema de obtención de variables físicas en fluidos de forma automatizada, que permite a los usuarios el ahorro de tiempo y dinero, obteniendo información de forma precisa por medio de interfaces amigables con el usuario, facilitando el manejo de datos. El cual funciona colocando un líquido, el cual por ahora solo puede ser yogurt, aceite comestible y agua, pero el cual se busca pueda ser cualquier fluido. El viscosímetro le proporciona al usuario el tipo de líquido que se está colocando y su viscosidad. Se busca, también que además de proporcionar el tipo de fluido se despliegue en pantalla las características mencionadas como, temperatura, peso, densidad, y que esta información pueda ser guardada en un archivo que permita tener un historial de la información proporcionada.

El dispositivo con el que se cuenta actualmente es capaz de reprogramarse para medir de forma automática la viscosidad de los fluidos específicos definidos por el usuario en función de las revoluciones por minuto del motor. Se busca en trabajos futuros minimizar el tamaño del dispositivo para reducir su costo y su manejabilidad, debido a que este dispositivo puede ser reprogramable y utilizado en el rango de valores que se desee para así poder obtener una mejor medición, también se busca agregar algunos sensores como temperatura, peso, y otras variables físicas necesarias para la determinación y pruebas en fluidos.

## 5. Apéndice 1

En este apartado se muestra la programación del PIC la cual puede ser reprogramada para mejorar el equipo por medio de programación en C. Algunas de las mejoras constan en añadir variables a medir como la temperatura, el peso, la densidad, etc.

```
#include <16F628A.h>
#FUSES NOWDT //No Watch Dog Timer
#FUSES INTRC_IO //Crystal osc <= 4mhz
#FUSES NOPUT //No Power Up Timer
#FUSES NOPROTECT //Code not protected from reading
#FUSES NOBROWNOUT //Reset when brownout detected
#FUSES MCLR //Master Clear pin enabled
#FUSES NOLVP //No Low Voltage Programming on B3(PIC16) or B5(PIC18)
#FUSES NOCPD //No EE protection
#define use_portB_lcd TRUE
#use delay(4000000)
#include <lcd.c>
int time0, time1;
int16 pulses0,pulses,time,rpm;
int1 rpmbit;
float V;
void rpmint(){ //Se obtienen las RPM//
rpm=60*pulses; //Formula para obtener RPM//
V=2250.50/rpm; //Formula para obtener la viscosidad//
if(pulses0!=pulses){ //Si pulsos0 no es igual a pulsos//
printf(lcd_putc,"f Viscosímetro R.\n"); //Se imprime en pantalla el Lema//
printf(lcd_putc,"\nRPM:%lu V:%f", rpm,V);} //Se imprime en pantalla las RPM y la Viscosidad//
```



```
if (rpm>=1500){
  output_high(pin_B3); //LED Verde Enciende
  delay_ms(1);}
if (rpm>1860){
  output_low(pin_B3); //LED Verde Apaga
  delay_ms(1);}
if (rpm<1500){
  output_low(pin_B3); //LED Verde Apaga
  delay_ms(1);}
if (rpm>=1020){
  output_high(pin_A2); //LED Amarillo Enciende
  delay_ms(1);}
if (rpm>1200){
  output_low(pin_A2); //LED Amarillo Apaga
  delay_ms(1);}
if (rpm<1020){
  output_low(pin_A2); //LED Amarillo Apaga
  delay_ms(1);}
if (rpm>=600){
  output_high(pin_A3); //LED Rojo Enciende
  delay_ms(1);}
if (rpm>900){
  output_low(pin_A3); //LED Rojo Apaga
  delay_ms(1);}
if (rpm<600){
  output_low(pin_A3); //LED Rojo Apaga
  delay_ms(1);}}
void main(){
  //Cuerpo del programa//
  lcd_init(); //Se inicializa el lcd//
  lcd_putc("If UTS Mecatronica \n"); //Se escribe mensaje en el lcd//
  lcd_putc("\n Viscosimetro R.");
  output_high(pin_B3);
  delay_ms(500);
  output_low(pin_B3); //Animacion con leds al iniciar//
  output_high(pin_A2);
  delay_ms(500);
  output_low(pin_A2);
  output_high(pin_A3);
  delay_ms(500);
  output_low(pin_A3);
  delay_ms(100);
  output_high(pin_B3);
  output_high(pin_A2);
  output_high(pin_A3);
  delay_ms(500);
  output_low(pin_B3);
  output_low(pin_A2);
  output_low(pin_A3);
  lcd_init(); //Se inicializa el lcd//
  lcd_putc("\fPor Bienvenido\n"); //Se escribe mensaje en el lcd//
  output_high(pin_B3);
  delay_ms(500);
  output_low(pin_B3); //Animacion con leds al iniciar//
  output_high(pin_A2);
  delay_ms(500);
  output_low(pin_A2);
  output_high(pin_A3);
  delay_ms(500);
  output_low(pin_A3);
  delay_ms(100);
  output_high(pin_B3);
```



```
output_high(pin_A2);
output_high(pin_A3);
delay_ms(500);
output_low(pin_B3);
output_low(pin_A2);
output_low(pin_A3);
while(true){
    //Se inicializa ciclo do//
    //Se mide la lectura de vueltas//
    if((input(PIN_A0)==1)&&(rpmbit==1)){ //Si la entrada A0==1 y rpmbit==1//
        //En esta sentencia y la siguiente se guardan las lecturas//
        pulses++; //Se incrementa la variable pulsos (guarda los pulsos)//
        rpmbit=0; //la variable rpmbit=0, para que la variable pulsos incremente una vez//
    }
    if(!input(PIN_A0)==1)&&(rpmbit==0){ //Si la entrada A0 es distinta a rpmbit==0//
        rpmbit=1; //se iguala rpmbit = 1 para que la variable pulsos vuelva incrementar cuando A0 sea 1//
        time0++; //se incrementa time0//
        if(time0>250){ //Si time0 es mayor e igual a 250 (para obtener 250 lecturas)//
            time1++; //time1 se incrementa//
            time0=0; //time0 se iguala a 0//
            if(time1>=4){ //Si time 1 es mayor e igual a 4 (para obtener 250 lecturas cada 4 veces
                //es decir 1000 lecturas)
                time0=0; //Se iguala time0 = 0//
            }
            if(pulses<1){ //Si los pulsos son menor que 1, es decir no hay
                //pulsos de entrada en A0//
                lcd_putc("\f Sistema en \n"); //motor sin giro//
                lcd_putc(" Espera....."); //motor sin giro//
                delay_ms(10); //retraso de 100ms//
            }
        }
    }
}
//Y en el proximo segundo reiniciar y volver a obtener 1000 lecturas en 1 segundo//
```

## 6. Referencias

- [1] D. D. Brone, «Equipos y laboratorio de colombia,» Viscosímetros, 2017. [En línea]. Available: [http://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos\\_mo.php?it=3156](http://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos_mo.php?it=3156).
- [2] B. E. S. Hernández, «Viscosímetro de Bola,» Instituto Politécnico Nacional, Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica, CDMX, 2008.
- [3] A. J. L. Ruiz, «Universidad Politecnica de Cartagena,» 2009. [En línea]. Available: <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/1902/pfc3278.pdf?sequence=1>.
- [4] M. J. Ariza, «Materiales industriales,» Universidad de Almería, Departamento de Física Aplicada, Almería ES, 2017.
- [5] W. International, «Viscosidad,» Widman International SRL, Santa Cruz Bolivia, 2017.
- [6] ATPP, «Tablas de viscosidad,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.atpplleal.com/Pujat/file/VISCOSIDAD.pdf>.



# Red Can Bus para la Sincronización de un Módulo de Inyección y Encendido de Combustible de un Motor de Combustión Interna

De Rosas Sandoval Esteban<sup>1</sup>, Goches Sánchez Alfonso<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Ingeniería Mecánica, Instituto Tecnológico Superior de Ciudad Serdán.

<sup>2</sup>Maestría en Automatización de Procesos Industriales, Universidad Politécnica de Puebla.

## Resumen

*Se presenta el desarrollo de una red CAN (Controller Area Network) cuya configuración consta de 3 nodos dispuestos para la sincronización y control de un módulo de inyectores de combustible y bujías automotrices. El sistema de comunicación CAN opera con  $\mu$ C's de hardware libre modelo FRDM-KL25Z, cuya arquitectura dispone de un procesador de la familia ARM Cortex-M0+ de 32 bits y periféricos I2C, SPI, UART y ADC. Se asigna un  $\mu$ C para cada nodo de la red y se comunica mediante el bus SPI a una tarjeta que dispone un controlador CAN MCP2515 interconectado al transceptor MCP2551 de microchip, permitiendo realizar la emisión-recepción de mensajes CAN de acuerdo al estándar ISO 11898.*

*El propósito principal de la red CAN que se plantea, es generar una alternativa tecnológica que pueda utilizarse como recurso didáctico para la formación de estudiantes de ingeniería en temas asociados a los sistemas de comunicación empleados en el control y operación de tecnologías automotrices y sistemas mecatrónicos. Puesto que la red CAN se configura con hardware libre, se describe la lógica de programación de los  $\mu$ C en función de los tipos de inyección y encendido de combustible que se emplean en la operación de un motor de combustión interna, con el fin de analizar y comprender la importancia del control óptimo entre la inyección de combustible y encendido para alcanzar la máxima eficiencia en dichos motores.*

**Palabras clave:** Comunicación CAN, Motores de Combustión Interna, Bus SPI.

## 1. Introducción

El proceso de formación de los estudiantes de ingeniería implica el desarrollo de actividades de formación teórica práctica que les permitan interpretar los conocimientos científicos y desarrollar habilidades para aplicar tales conocimientos en la solución de problemas tecnológicos que sean identificados en su entorno. El uso de los recursos didácticos empleados en la formación de ingenieros es fundamental para alcanzar los objetivos de formación planteados en los diferentes programas de estudio, sin embargo, son los facilitadores de cada asignatura, quienes identifican las necesidades didácticas para alcanzar un aprendizaje significativo que permita a los estudiantes alcanzar las competencias específicas para involucrarse en la innovación y creación de nuevas tecnologías requeridas para mejorar la calidad de vida en los diversos entornos sociales [1].

Para el año 2014, México se logró posicionar como el número ocho en producción de automóviles de acuerdo al ranking mundial [2]. Dato que no resulta ser alentador si se analiza desde la perspectiva de generación de tecnología nacional que se integre en la producción automotriz, pues la mayoría de las actividades productivas se asocia al maquilado de componentes automotrices, tomando como referencia diseños y prototipos de invención extranjera; dejando a un lado la



generación de tecnología nacional , pues en el mejor de los casos el talento humano es centralizado por las principales marcas automotrices, situación que implica la generación de tecnología en México, por mexicanos pero con derechos totalmente en propiedad de las firmas automotrices de otros países [3].

El planteamiento anterior no obedece a un sentimiento nacionalista, mejor aún, establece el escenario de referencia que ha motivado a la generación de una alternativa tecnológica que pueda ser utilizada como recurso didáctico para la formación de ingenieros cuyo interés se asocia al análisis e innovación de tecnologías automotrices. Propiciando un ambiente de aprendizaje que incentive la creación de tecnologías nacionales que puedan ser comercializadas en los mercados nacional e internacional, estimando una consecuencia positiva asociada a la mejora en la calidad de vida de los ingenieros mexicanos, tras un mayor flujo de efectivo en retribución a sus servicios como profesionistas.

La propuesta tecnológica asociada a esta publicación consiste en la configuración de una red CAN interconectada con un módulo de inyectores y bujías automotrices, actuadores que se emplean en el proceso de combustión de un Motor de Combustión Interna (MCI). Por tanto, esta red permitirá realizar actividades experimentales para analizar los tiempos de sincronización de bujías e inyectores en base al sistema MFI o Sistema de Inyección Multipunto [4]. Importante mencionar que el sistema de comunicación CAN es empleado en la mayoría de los sistemas de control automotriz [5], por lo que el prototipo en cuestión ofrece diversos recursos para el desarrollo de actividades prácticas requeridas en la formación de ingenieros interesados en las tecnologías automotrices.

## **2. Planteamiento de la problemática y propuesta de solución.**

Existe la necesidad de generar alternativas tecnológicas que puedan ser utilizadas como recursos didácticos en el desarrollo de actividades de formación práctica para estudiantes de ingeniería, con el propósito de detonar habilidades e incentivar a los futuros ingenieros a incursionar en la creación de recursos tecnológicos automotrices nacionales, que les permitan competir en los mercados internacionales, mejorando sus condiciones socioeconómicas y generando más y mejores oportunidades para miembros de la sociedad donde se encuentran inmersos.

En la carrera de Ingeniería Mecánica del I.T.S. de Ciudad Serdán, se ha identificado la necesidad de diseñar y construir un prototipo didáctico para el desarrollo de actividades de formación práctica que permitan experimentar y analizar los diferentes métodos de sincronización entre inyectores de combustible y bujías automotrices, así mismo se pretende establecer un sistema de control para dichos actuadores a través de la configuración de una red de comunicación con el uso de hardware libre que contemple el protocolo CAN, mismo que se emplea para los sistemas de control de autos comerciales.

### **2.1 Objetivo**

Desarrollar la configuración de un prototipo con características didácticas integrado por una red CAN de 3 nodos para controlar la sincronización de un módulo de inyectores y bujías de encendido automotriz, actuadores que se interconectan a un sistema mecatrónico soportado por hardware libre.

### **2.2 Hipótesis**

Configurar una red CAN de 3 nodos soportada en hardware libre permite establecer un control en la sincronización de actuadores automotrices empleados para la inyección y encendido de combustible en un MCI, variando los parámetros de secuencia de acuerdo al sistema MFI.



### 3. Referencia teórica.

La referencia teórica considerada para el desarrollo de este proyecto, se centra en dos temas:

- Generalidades del Protocolo CAN.
- Sistemas de Inyección y Encendido Automotriz.

#### 3.1 Generalidades del Protocolo CAN

El protocolo CAN fue creado por la firma BOSCH, como una alternativa tecnológica para optimizar el sistema de control de actuadores y sensores que intervienen en la operación de un automóvil. Dicho protocolo actualmente se ha adoptado como un sistema de comunicación industrial, gracias a las siguientes ventajas:

- Inmunidad a interferencias de señal.
- Simplificación de cableado en la red de control.
- Protocolo MIMO.
- Transmisión de datos a distancias de hasta 1000 m.

Además de los atributos anteriores, el protocolo CAN ha sido estandarizado bajo el código ISO 11898, por tanto, existe la posibilidad de interconectar diversas redes de control que requieran de una transmisión de datos para su operación [6].

La topología de una red CAN establece la conexión de tres dispositivos para configurar cada uno de los nodos que la puedan integrar. El diagrama de la figura 1 identifica la nomenclatura de los componentes que deben integrarse en un nodo CAN.



Figura 1 Configuración de un nodo CAN

Para el presente proyecto se considera como el elemento HOST al  $\mu$ C FRDMKL25Z, el cual puede ser programado desde un IDE con conexión a internet por parte de la plataforma mbed.com o a través del toolchain Keil  $\mu$ Vision de ARM; en ambos casos se contempla una programación en C/C++.

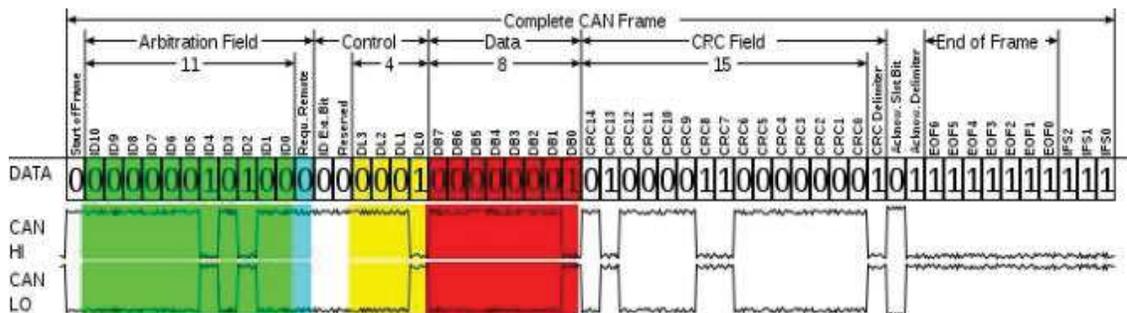


Figura 2 Trama de un mensaje CAN



El desarrollo del código correspondiente al HOST de la red CAN propuesta, toma como referencia la trama que se muestra en la figura 2, en la que se desglosa el contenido de un mensaje CAN, destacando un identificador de 11 bits. El identificador de cada mensaje permite establecer la prioridad con que se comunica dentro de una red, por tanto, si un mensaje tiene un identificador con un valor binario menor, entonces dicho mensaje tiene una mayor prioridad de ser transmitido [7].

### 3.2 Sistemas de Inyección y Encendido Automotriz

Considerando que la red CAN del presente proyecto se aplica a un módulo de inyección y encendido de combustible, se contempla el principio de funcionamiento de un MCI bajo el ciclo termodinámico Otto, en el que se establece un ciclo de cuatro procesos: 1. Admisión, 2. Compresión, 3. Encendido y 4. Escape [8].

El tiempo de encendido y el proceso de inyección de combustible obedecen a dos de estos procesos, que son la compresión y admisión respectivamente, y se operan con el uso de bujías e inyectores, cuyo tiempo de accionamiento ha sido contemplado como la principal variable para mejorar la eficiencia en un MCI [9]. En la figura 3 se muestra un diagrama de las tres principales configuraciones de secuencia entre actuadores de inyección y encendido con respecto al giro del cigüeñal de un MCI; mismas que se consideran como referencia para diversificar el modo de control de la red CAN que ostenta este trabajo.

En a) se indica la configuración de secuencia simultánea, cuya característica principal es que la inyección del combustible se efectúa en todos los inyectores por cada 360° que gira el cigüeñal, independientemente de que la válvula de admisión este abierta. Para el caso de b) se le conoce como modo de inyección y encendido semi-secuencial, en dicha configuración se accionan únicamente dos de los cuatro inyectores por cada giro del cigüeñal.

La configuración secuencial corresponde a c), esta tiene la característica de que se enciende un inyector a la vez, lo que ofrece un mayor rendimiento del combustible, esta configuración puede disponer los inyectores en el conducto de admisión de un MCI o en el otro de los casos los inyectores se pueden disponer directamente en cada una de las cámaras de combustión, evitando pérdidas por volatilidad del combustible.

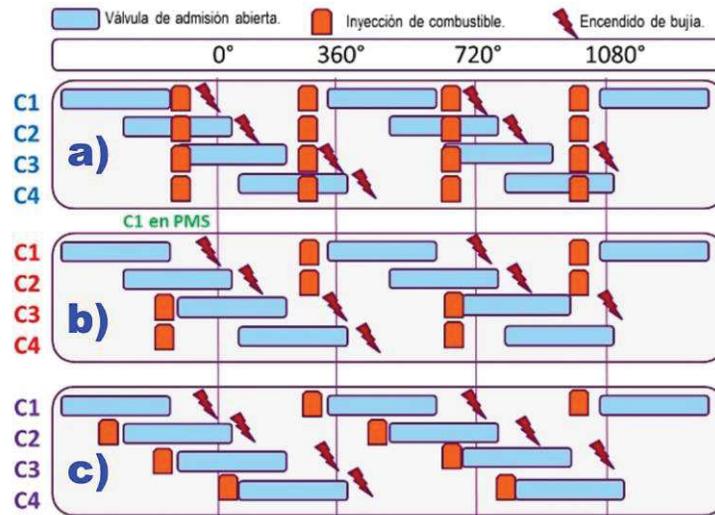


Figura 3 Tipos de secuencia de Inyección y Encendido en un MCI.



El ciclo planteado en el diagrama anterior, corresponde a un MCI de cuatro pistones, así mismo puede notar que como referencia se contempla el giro del cigüeñal con hasta 3 revoluciones por cada ciclo de combustión, además se indica la apertura de la válvula de admisión correspondiente a los pistones C1, C2, C3 y C4 y el encendido de las bujías. El lector puede notar que respecto al accionamiento de las bujías en los 3 tipos de secuencia es el mismo, sin embargo, también dicho accionamiento depende del giro del elemento mecánico principal de un MCI y que es el cigüeñal.

## 4. Diseño metodológico.

Para desarrollar el diseño e implementación de una red CAN capaz de controlar un módulo de inyectores y bujías empleadas en el encendido de un MCI, se consideraron tres aspectos:

1. Compatibilidad en el hardware seleccionado para establecer una comunicación CAN.
2. Adaptación de un lazo de control cerrado, el cual incluye sensores y elementos mecánicos utilizados en un MCI comercial.
3. Consideración de características didácticas para la operación del sistema.

En este último aspecto se contemplaron características didácticas como la disposición de elementos para la conexión de actuadores de forma temporal y segura, además de dispositivos POKA YOKE, con el propósito de evitar daños al sistema por errores en la conexión de sus elementos.

### 4.1 Configuración Hardware-Software de la red CAN.

A nivel hardware la red se configura por tres nodos cuya estructura consiste en un microcontrolador de la serie FRDM-KL25Z, cuya arquitectura posee un procesador ARM Cortex-M0+ de 32 bits y periféricos I2C, SPI, UART y así como un GPIO con ADC y DAC tal como se muestra en la figura 4, el cual se interconecta a una tarjeta de la marca Seeed Studio V1.2. Dicha tarjeta contiene un controlador CAN modelo MCP2515, mismo que permite establecer una conexión entre con el  $\mu\text{C}$  mediante el protocolo SPI a una frecuencia de hasta 10 MHz.

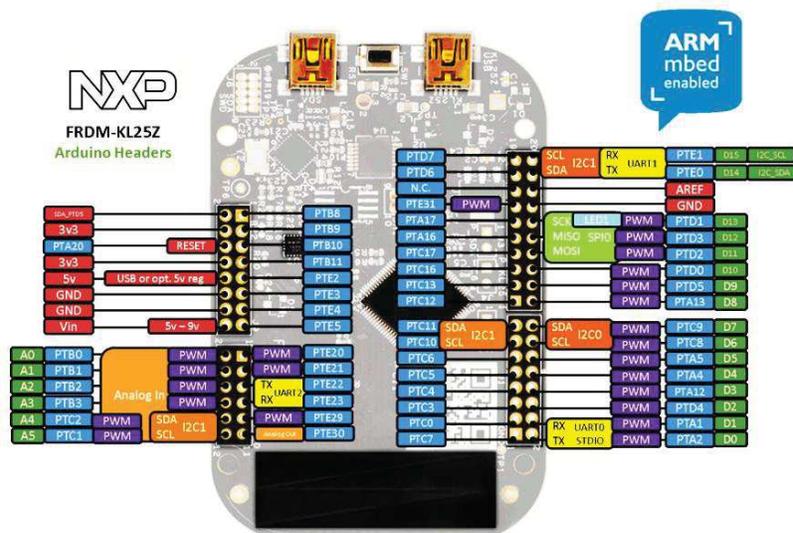


Figura 4 Configuración de entradas y salidas de la FRDM-KL25Z



Además del controlador CAN, la Seed Studio V2.0, contiene un transceptor modelo MCP2551, con una capacidad de transmisión de datos en la red CAN de hasta 1Mb/s. Dentro de los complementos de dicha tarjeta se incluye un conector DB9 y una terminal para la conexión del cableado CAN High y CAN Low requeridos para una red con el mismo nombre.

Se muestra en la figura 5 la configuración de la red CAN a nivel hardware, así mismo puede notar que se interconectan dos líneas de cableado con resistencias en los extremos de 120 ohm. Es importante realizar la conexión de tales resistencias en las líneas CAN, pues de estas depende establecer los dos niveles de una señal CAN mismos que se denominan CAN High y CAN Low. Si se prescinde la conexión de dichas resistencias, los mensajes transmitidos por el HOST no podrán distinguirse en los niveles de voltaje definidos por los niveles de la señal CAN y por tanto se provocarán errores en la comunicación de dispositivos mediante este protocolo.

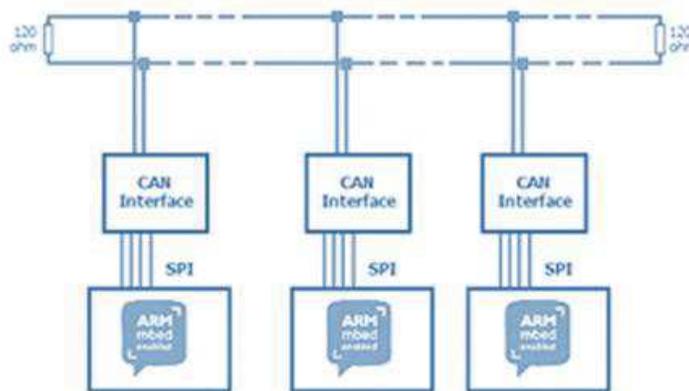


Figura 5 Conexión del hardware para una red CAN de 3 nodos.

Para evitar saturación de la señal por impedancias, se recomienda que los cables correspondientes a las líneas High y Low de la señal CAN sean trenzados, además se debe evitar derivaciones innecesarias en dichas líneas de señal.

El prototipado correspondiente a la red propuesta, fue desarrollado mediante placas de prueba, sin embargo, se recomienda que, al realizar la conexión de una red para controlar un determinado sistema, se recomienda soldar los puntos de unión de las líneas CAN sin exceder en cuanto al metal de aporte, con el propósito de evitar impedancias en la señal de comunicación correspondiente.

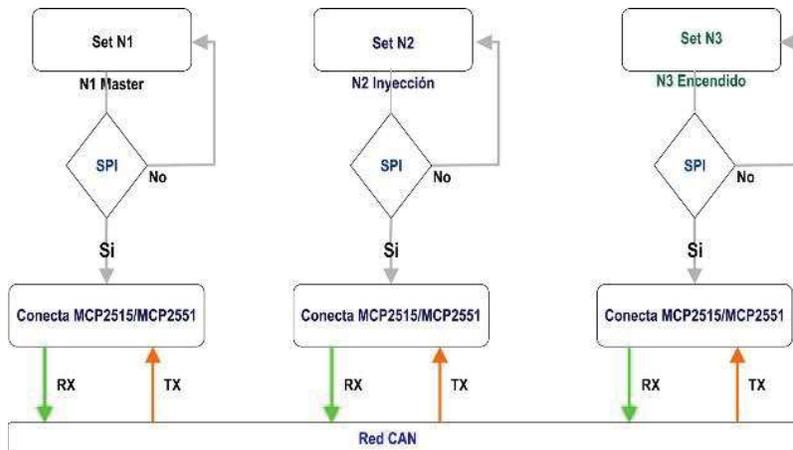


Figura 6 Algoritmo para comunicación SPI.



A nivel software, el código de programación fue desarrollado en dos etapas, donde la primera permite establecer los parámetros para comunicar el  $\mu C$  a la Seed Studio V 2.0 mediante el protocolo SPI; la segunda etapa del código contempla la parametrización para emisión recepción de los mensajes CAN que se comparten entre los nodos N1, N2 y N3.

En la figura 6 se muestra el algoritmo contemplado para generar el código que permite la comunicación SPI en cada nodo. Importante mencionar que, de los tres nodos planteados para la red en cuestión, N1 se ha asignado en la modalidad Maestro y los nodos N2 y N3 como elementos esclavos responsables del accionamiento sincronizado de los inyectores y bujías respectivamente.

Dentro de los parámetros relevantes para lograr la comunicación SPI entre el  $\mu C$  y la Seed Studio, se consideró lo siguiente:

- Transmisión de datos a 8 bits.
- Frecuencia de 1 MHz.

Tras la comunicación SPI se procedió a desarrollar el código correspondiente a la configuración de los mensajes CAN de acuerdo al nodo que los transmite o recibe, así mismo se establecieron los parámetros de la señal que el  $\mu C$  toma como referencia para establecer la sincronización de los actuadores de inyección y encendido. Dicha señal proviene de un sensor CKP (Crankshaft Position), mismo que es responsable de medir el giro del cigüeñal para que con la señal generada, el  $\mu C$  la procese y establezca el accionamiento de los actuadores de encendido e inyección.

El código para lograr dicha sincronización de actuadores, fue desarrollado en base al algoritmo mostrado en la figura 7. El lector puede notar que se establecen condiciones en función del valor en grados para cada giro del cigüeñal, así mismo se comenta que dicho algoritmo corresponde a la modalidad de inyección y encendido de forma simultánea y que se relaciona a la primera secuencia de encendido de la figura 3.

Los identificadores usados para los nodos N2 y N3, fueron establecidos para un formato de comunicación estándar, situación que implica la asignación de valores no mayores a 11 bits. Por tanto, el identificador de N2 tiene un valor menor que el de N3, propiciando a que los mensajes emitidos por N1 a la red CAN y sean de mayor prioridad para N2, responsable del accionamiento de los actuadores empleados en la inyección de combustible.

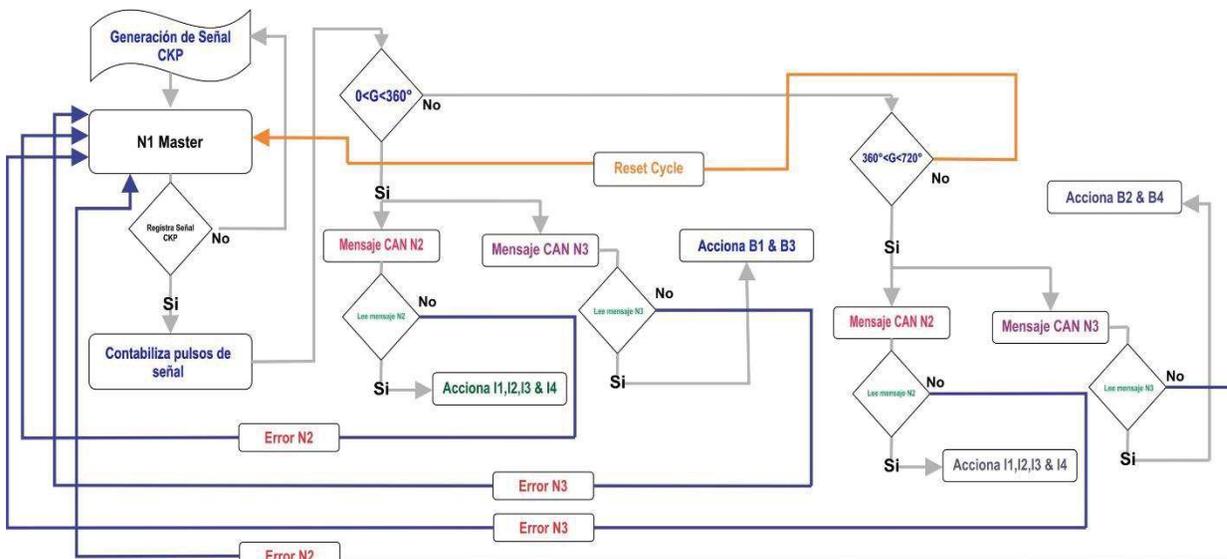


Figura 7 Algoritmo para el control de la red CAN en modalidad de secuencia simultánea.



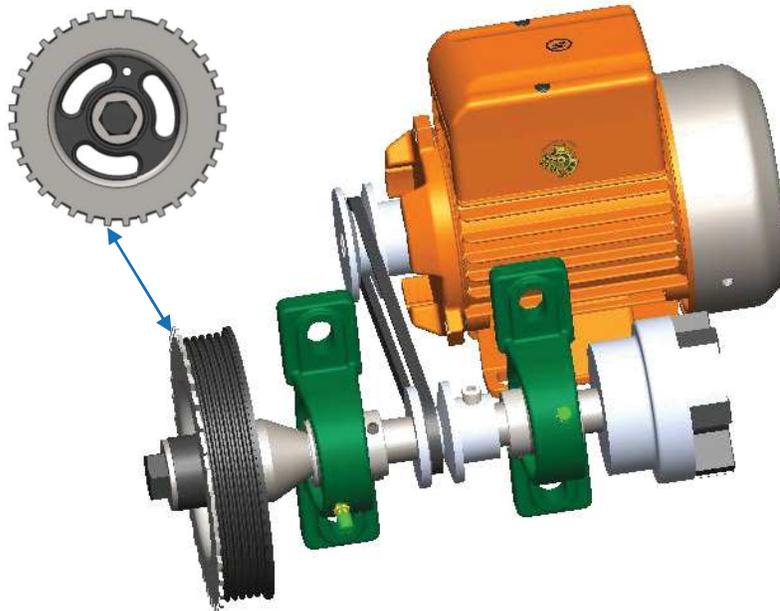
Puesto que N2 y N3 han sido asignados como esclavos, el código contempla un mensaje de error que es emitido por dichos nodos en caso de que no exista una lectura de los mensajes transmitidos por el master N1, de manera tal que en el momento que exista ese tipo de errores el ciclo sea interrumpido hasta ser reestablecido por el usuario de la red. Además, puede observar el lector que existe una señal de realimentación que establece un reset en el ciclo de inyección y encendido, una vez que el  $\mu\text{C}$  ha registrado un equivalente en grados a dos giros del cigüeñal.

Los identificadores que se consideraron para los mensajes CAN de cada nodo se acotaron a un valor binario de 11 bits y considerando que el de mayor prioridad sea asignado a N1, quedando de la siguiente forma:

- Identificador N1 >> 11111001111
- Identificador N2 >> 11111010010
- Identificador N3 >> 11111010000

#### **4.2 Acondicionamiento de elementos mecánicos a la red de control CAN.**

Con el propósito de que el sistema de Inyección y Encendido de combustible controlado por una red CAN, cumpliera con aspectos de didáctica, se consideró la necesidad de adaptar el sensor CKP antes mencionado, el cual será instalado de forma tangente a una polea dentada, la cual gira junto al cigüeñal como se muestra en la figura 8, de manera tal que se registren los pulsos por el  $\mu\text{C}$  y realice una evaluación del giro para enviar las señales de mando por un mensaje CAN a los nodos N2 y N3. Respecto a los actuadores empleados para la inyección y encendido, se obtuvieron de dos MCI de distintos proveedores y fueron adaptados con el propósito de integrarlos en el prototipo didáctico correspondiente al planteamiento de este proyecto.

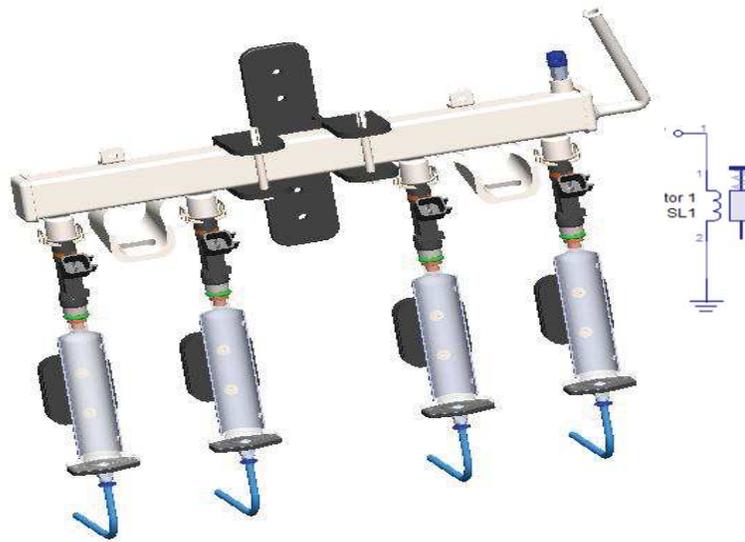


**Figura 8 Adaptación de polea para registro de pulsos.**

El tren de pulsos generado por el giro de la polea es equivalente al número de dientes que esta posee, además se identifica la ausencia de uno de estos dientes, lo que permite a sensor CKP registrar una interrupción de pulsos que equivale al registro de un giro completo en la polea.

Los actuadores de inyección también llamados inyectores, funcionan bajo el principio de un solenoide, y operan con una señal de voltaje de 12 V, por lo tanto y como puede apreciarse en la figura 9, se estableció un acoplamiento del actuador para ser controlado por el  $\mu\text{C}$  con el uso de relevadores cuya conmutación es posible con el uso de una señal lógica cuyo valor máximo de acuerdo al  $\mu\text{C}$  es de 5V.

Puede observar en la figura que los inyectores se conectan a elementos cilíndricos que permitirán contener el fluido empleado para la operación de estos y retornarlo al contenedor principal, de manera tal que se eviten derrames del fluido. Dichos contenedores cilíndricos también disponen de una graduación en ml, con el propósito de que los usuarios del prototipo identifiquen los rendimientos en la inyección de combustible y establezcan comparativos entre las distintas configuraciones de secuenciado.



**Figura 9 Inyectores de combustible.**

Con respecto a los actuadores empleados para analizar la secuencia de encendido, se consideraron bujías conectadas a bobina automotrices tipo COP (Coil on Plug) como las que se muestran en la figura 10. Dichas bobinas tienen la característica de trabajar independientes, por lo que el voltaje generado para provocar el arco eléctrico en la bujía no se comparte entre actuadores de encendido.



**Figura 10 Bobina de encendido tipo COP.**



Las bobinas tipo COP poseen una configuración electrónica que permite hacer el accionamiento mediante transistores de potencia, mismos que se encuentran incrustados en cada bobina. Dichos actuadores han sido adaptados a la red CAN mediante circuitos de opto acoplamiento, evitando así que una descarga eléctrica o corto circuito provocado por el usuario, dañe los elementos de hardware que constituyen a los nodos de dicha red. Las bobinas COP son exclusivas para MCI que operan bajo la configuración de inyección y encendido en modo secuencial, sin embargo, se han adaptado para que cubran las funciones de otro tipo de bobinas que son diseñadas para operar bajo los esquemas simultaneo y semi-secuencial expuestos anteriormente.

Uno de las consideraciones técnicas que se tuvieron para el diseño de los circuitos eléctricos necesarios en la adaptación de los actuadores ya expuestos, fue la disposición de una serie de fusibles y un circuito de tierra exclusivo para los voltajes de alimentación de los actuadores y otro sistema de tierra para los elementos de control.

Otra característica del módulo de actuadores para el análisis de encendido e inyección, y con el fin de fortalecer la didáctica del prototipo, se consideró una serie de conexiones tipo banana, las cuales permiten una fácil conexión-desconexión de las diferentes líneas de alimentación y control de los actuadores, de manera tal que el estudiante desarrolle actividades de formación práctica asociadas a la lógica de conexión correspondiente a la configuración de la red CAN expuesta.

En la figura 11 se muestra un ejemplo del diseño electrónico considerado para establecer el acoplamiento del  $\mu\text{C}$  con la parte de potencia del prototipo didáctico, dicho acoplamiento se diseñó bajo 3 alternativas y en consideración de la velocidad de conmutación en dichos acoplamientos. Una de las alternativas para la conmutación de los actuadores es la ya expuesta mediante relevadores, la segunda propuesta consiste en la disponibilidad de opto-acopladores con salida a transistor.

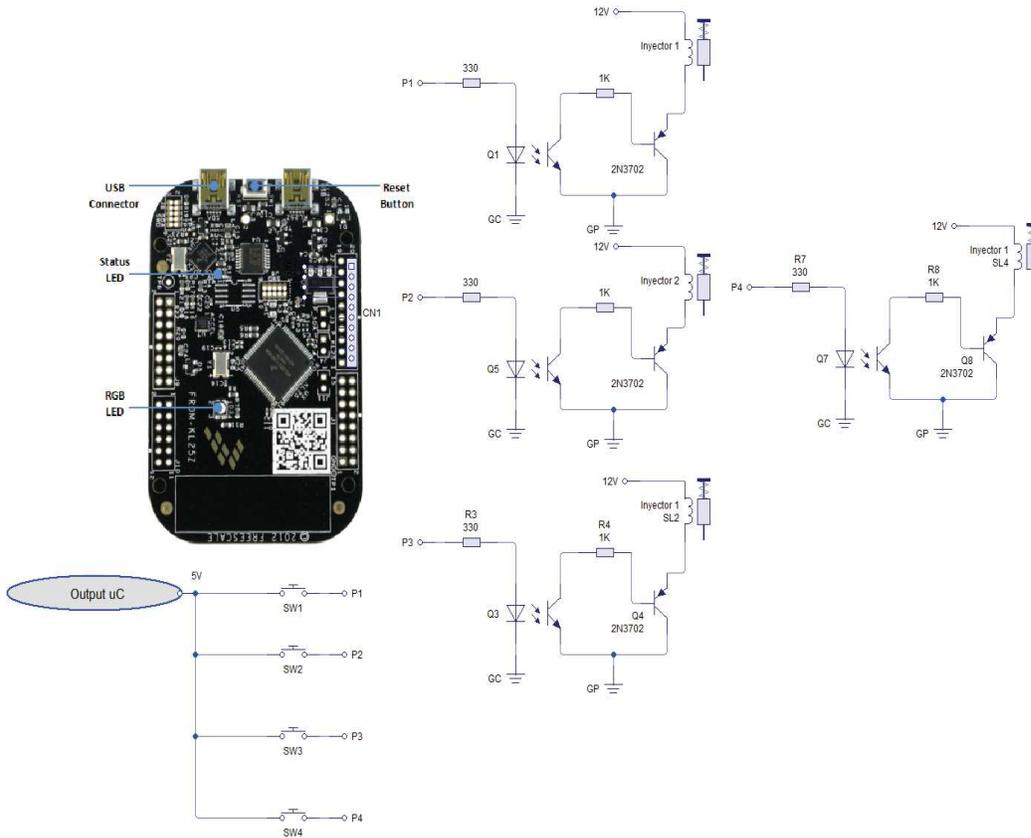


Figura 11 Acoplamiento electrónico para el encendido de bujías.



La tercera alternativa de acoplamiento, contempla el uso de tiristores tipo MOSFET de conmutación lógica, los cuales ofrecen una velocidad de conmutación óptima para lograr que los actuadores se accionen sin retrasos en la señal de conmutación.

## 5. Resultados.

Según la hipótesis planteada para este trabajo, se considera aceptada, pues se ha logrado la configuración de una red CAN compuesta por tres nodos para establecer el control de un módulo de inyección y encendido de combustible, en base a los parámetros de operación de un MCI. Dentro de los resultados que al momento pueden destacar del presente trabajo, se enlistan los siguientes:

- Configuración de una red CAN no restringida por el hardware y reprogramable para mejorar el control de un sistema adaptado para la sincronización de un módulo de inyección y encendido de combustible empleado en un MCI.
- Generación de un recurso didáctico con diversas aplicaciones para el desarrollo de actividades de formación práctica, destacando: integración de un sistema embebido, análisis de los tipos de secuencia empleados en la inyección y encendido de combustible, control de variables físicas mediante hardware libre.

De forma implícita a este proyecto, también se considera un resultado relevante la aportación de la experiencia y competencias adquiridas mediante el mismo, a los lectores de este documento y que se interesan por temas asociados al contexto de este documento.

## 6. Conclusiones.

La configuración de redes CAN con hardware resulta ser una tarea no sencilla, sin embargo, permite comprender la importancia de los protocolos de comunicación en la integración de un sistema mecatrónico, un sistema embebido o cualquier otra tecnología que dependa de la transmisión de datos para su operación.

Integrar tecnologías para la formación de individuos en temas específicos asociados a la comprensión del funcionamiento de una tecnología en específico o la interpretación de un principio científico y su aplicación en la atención de una necesidad identificada en el entorno, implica una serie de consideraciones como el enfoque didáctico con que se diseñan dichas tecnologías, aspectos de seguridad e higiene y disposición de recursos que induzcan a los individuos en formación a construir su propio conocimiento y a desarrollar habilidades que les brinden soporte en un futuro desempeño profesional.

## 7. Agradecimientos

Manifiesto mi agradecimiento a la Universidad Politécnica de Puebla y al Instituto Tecnológico Superior de Ciudad Serdán por la oportunidad que me han dado para el desarrollo del proyecto expuesto en el presente documento y que obedece a la generación de una alternativa tecnológica orientada al fortalecimiento de los recursos didácticos necesarios para la formación de ingenieros.



## Referencias

- [1] Grassiel, M. et. al. *Modelo educativo para el siglo XXI: formación y desarrollo de competencias profesionales*, Dirección General de Educación Superior Tecnológica, pág. 12, 2012.
- [2] Meza, N. *Los 10 países con mayor producción de autos en el mundo*, Forbes México, 2014.
- [3] Estrada, J. *México at full throttle México at full throttle*, Negocios PRO MEXICO. Pro México, pág. 22, 2012.
- [4] SAE. *SAE-J1930: Electrical/electronic systems diagnostic terms, definitions, abbreviations and acronyms*, SAE, Section 40 CFR 86.1806-05(h)(1)(v), pág. 727, 2002.
- [5] National Instruments. *Introducción a CAN. National Instruments*. NI, pág. 1, 2011
- [6] Zhu, Q., Dongmei, Z., & Xunwen, S. *Distributed remote temperature monitoring and acquisition system based on CAN bus*. In Prognostics and Health Management Conference, IEEE, pág. 1-4, CHINA, 2010.
- [7] Texas Instruments. *Introduction to the Controller Area Network (CAN)*. Texas Instrument Incorporated, 2016.
- [8] Cengel, Y. & Boles M. (2012). *Termodinámica*. Mc Graw Hill, México, 5ta. edición, 2012.
- [9] Genta, G. et. al. (2014). *The Motor Car*. Link, F., New York, NY, 1ra. edición, 2014.



# Análisis de Trayectoria de Flexoextensión para el Dedo Índice Basado en Procesamiento de Imágenes para un Mecanismo Rehabilitador.

Rodríguez León Jhon Freddy<sup>1</sup>, Aguilar Pereyra José Felipe<sup>2</sup>, Castillo Castañeda Eduardo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Querétaro, Instituto Politécnico Nacional, 76090 Querétaro, Qro, México.

<sup>2</sup>División de Tecnologías de Automatización e Información, Universidad Tecnológica de Querétaro, Querétaro, Qro, México.

## Resumen

*El presente documento describe el método para identificación de la trayectoria del dedo índice usando el análisis para procesamiento de imágenes, la trayectoria analizada corresponde a los movimientos de Flexoextensión realizados por la punta del dedo de forma natural. Debido a que el método de identificación de trayectoria considera unidades de pixeles; se procede a realizar el proceso de calibración de la cámara aplicando el método de Heikkila. El objetivo es expresar la trayectoria del dedo índice en milímetros para compararse con la trayectoria generada por un mecanismo rehabilitador, esto validará la trayectoria generada por un mecanismo manivela-corredera. Dispositivo desarrollado en Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional.*

**Palabras clave:** Flexoextensión, Mecanismo Rehabilitador, Procesamiento de Imágenes.

## 1. Introducción

La mano constituye un órgano extremadamente complejo morfológicamente, ya que está conformado por muy disímiles estructuras [1]. Está articulada por los dedos índice, anular, medio y meñique llamados dedos largos, además del dedo corto, único y proximal llamado pulgar. Cada uno de ellos se caracteriza por estar compuesto por tres falanges excepto el dedo pulgar que solo tiene dos [2].

Los dedos de la mano cumplen la función de realizar tareas de fuerza y presión, tiene la capacidad de detectar texturas, pueden registrar sensaciones como calor o frío y sostener objetos. Para realizar estas actividades ejecuta movimientos como flexión, extensión, aducción y abducción [3].

Entre las diversas enfermedades que puede sufrir el ser humano, las que afectan la motricidad fundamental de la mano, son de especial atención. En efecto, la mano del hombre es uno de los órganos más estudiados del cuerpo, después del cerebro. Esto ha llevado a que en las últimas décadas haya sido objeto de análisis e investigación, no sólo en el campo médico, sino también en el campo de la ingeniería [4].

Los instrumentos más usados en los procesos de rehabilitación están basados en férulas de Stack, ortesis pasivas y activas; éstas se adaptan a las articulaciones interfalángicas proporcionando presiones mediante diferentes apoyos o controlando los movimientos de Flexoextensión de los dedos [5].

Además de los instrumentos de uso manual, existen también equipos especializados para asistir en la terapia de rehabilitación. Sin embargo, estos sistemas automáticos son de un alto costo,



esto los convierte en dispositivos inaccesibles para muchas de las instituciones públicas que no cuentan con altos recursos. Un ejemplo de estos sistemas es el llamado Amadeo®, comercializado por la empresa austriaca Tyromotion. Este dispositivo se caracteriza por asistir en la terapia de rehabilitación para los dedos de la mano, su precio en el mercado está alrededor de los 43.000 euros [6].

Por otro lado, mediante el método de procesamiento de imágenes, es posible tener una ejecución de las imágenes orientado a la extracción de información de tipo cualitativo o cuantitativo. Para desarrollo de este documento se hace énfasis en la obtención del punto de interés basado en la punta del dedo índice. Sin embargo, existen otros métodos para la identificación de trayectorias en el área de rehabilitación. Entre los más destacados se encuentra el uso de tecnología de realidad virtual mediante sistemas como OptiTrack, sistema óptico de alta fidelidad, precisión y costo elevado de adquisición. Otra herramienta es la desarrollada por Microsoft llamada Kinect, caracterizada por su robustez, alto rendimiento y bajo costo [7].

Por tanto, se presenta la identificación de la trayectoria del dedo índice mediante análisis de imágenes, además del proceso de calibración de la cámara aplicando el método de Heikkila [8]. Esto validará el funcionamiento del mecanismo con el objetivo de conocer la trayectoria que debe seguir el prototipo a desarrollar.

## 2. Análisis de Trayectoria

Los mecanismos de rehabilitación cumplen con el objetivo de reproducir trayectorias basadas en los movimientos naturales que generan los dedos de la mano. Debido a la complejidad que representa el dedo pulgar, este no se tiene en cuenta en el presente análisis.

El análisis se realizará sólo para el dedo índice, que es representativo para los cuatro dedos largos. Por tanto, se generan los movimientos controlados de Flexoextensión para el dedo seleccionado, los cuales son grabados y mediante software, se hace la descomposición de éstos en imágenes dando como resultado 450 imágenes, luego se analiza cada una de ellas y se obtienen las coordenadas que construyen la trayectoria que está generando el dedo en el punto Q. La Figura 1 muestra 4 imágenes de las 450 utilizadas para extraer la trayectoria.

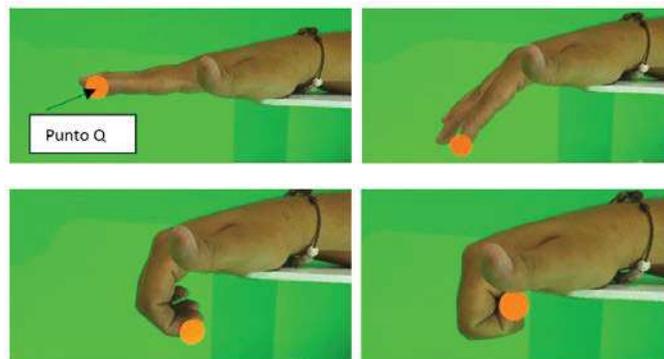


Figura 1. Descomposición del video en imágenes.

En la Figura 1 se hizo la identificación de la punta del dedo índice para los movimientos de Flexoextensión, de modo que, mediante estas imágenes se procede a identificar el color que representa el punto de generación de la trayectoria Q. A través del software ImagenJ [9] se determinan los valores RGB del objeto que representa el punto Q, ver Figura 2. Los valores RGB se obtienen a partir de los histogramas de intensidad, ver Figura 3.

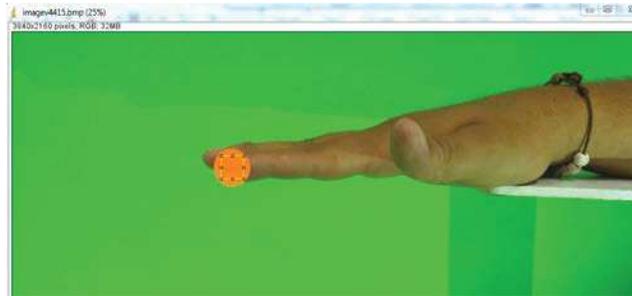


Figura 2. Identificación del color requerido

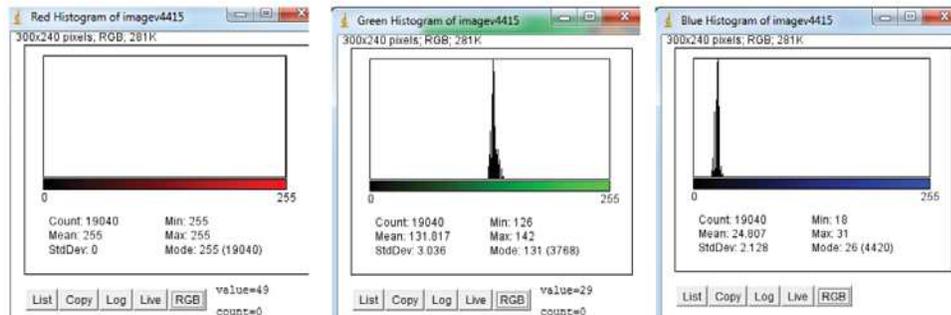


Figura 3. Histogramas de las componentes RGB.

Se realiza la clasificación de este punto respecto de los demás datos de la imagen; se le asignó el color negro al punto **Q** y color blanco a los demás datos de la imagen, tal como se aprecia en la Figura 4.

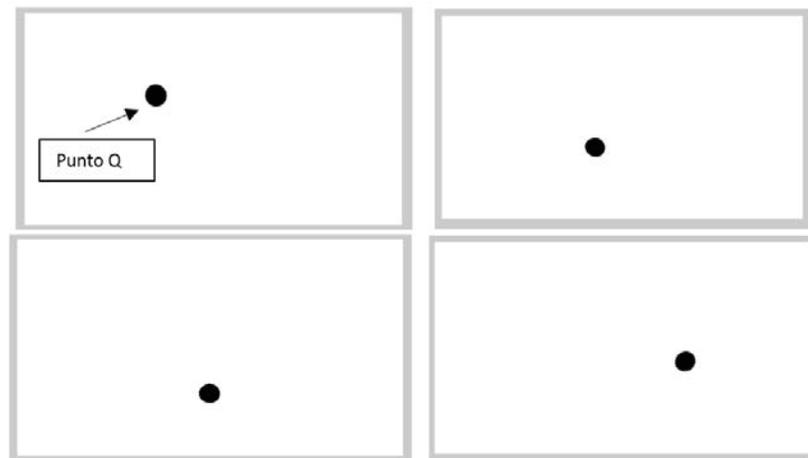


Figura 4. Identificación del punto de interés.

Se analizó el centro de masa del punto **Q** mediante coordenadas **x-y** en cada una de las imágenes, se procede a graficar los puntos para visualizar la trayectoria que está generando el dedo en el punto **Q** para los movimientos de Flexoextensión, en la Figura 5 se muestra el resultado obtenido.

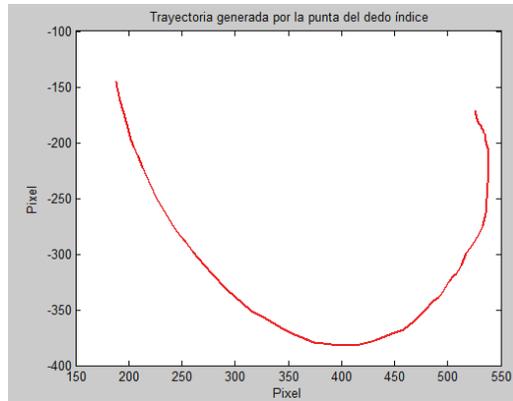


Figura 5. Trayectoria generada por la punta del dedo.

En la Figura 5 se observa la trayectoria que genera el dedo índice, sin embargo, las unidades de los ejes están en pixeles. Por tal motivo se hace uso de la calibración de la cámara para conocer la relación pixel a milímetro.

### 3. Método para Calibración de Cámara

El presente capítulo consiste en determinar los parámetros internos de la cámara, tales como distancia focal, factores de distorsión y puntos centrales del plano imagen. Teniendo en cuenta que en el estado del arte se presentan gran variedad de métodos, los cuales difieren en la forma de capturar las imágenes y los parámetros intrínsecos y extrínsecos [10].

Para este análisis se usó el **software Matlab R2014a**, el cual incluye la herramienta “**Camera Calibration Toolbox**” en la ventana de opciones.

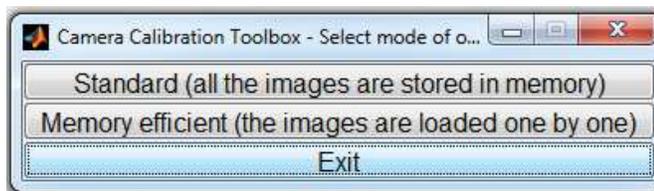


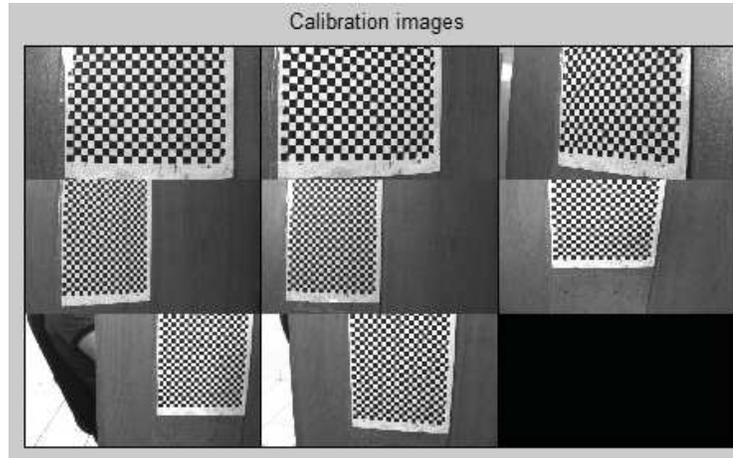
Figura 6. Herramientas de calibración.

En la figura 6 se observa la Toolbox de Matlab, para ingresar a esta interfaz se ingresa en la barra de comandos la palabra **calib\_gui**. Luego se selecciona la opción **Standard (all the images are stored in memory)** como se observa en la Figura 7. Teniendo en cuenta que para el proceso de calibración se aplica el principio de Heikkila, se deben hacer uso de un patrón de calibración al cual se le toman diferentes fotografías para distintas posiciones de la cámara.



Figura 7. Herramientas para calibración

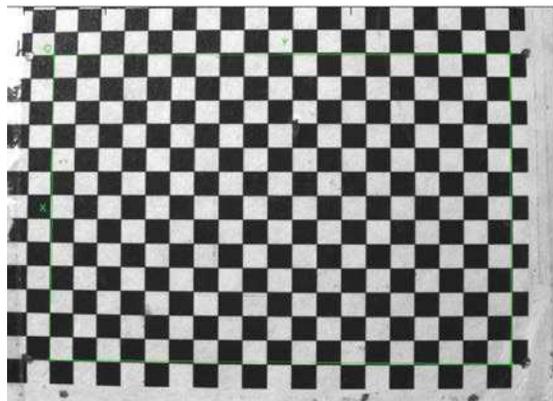
Luego se selecciona la opción **Image names**, la cual permite llamar a cada una de las imágenes que fueron tomadas del patrón de calibración. Es importante tener en cuenta que el número de imágenes tomadas del patrón afecta al error de calibración de la cámara, por tanto, se sugiere tomar un número mayor o igual a 8.



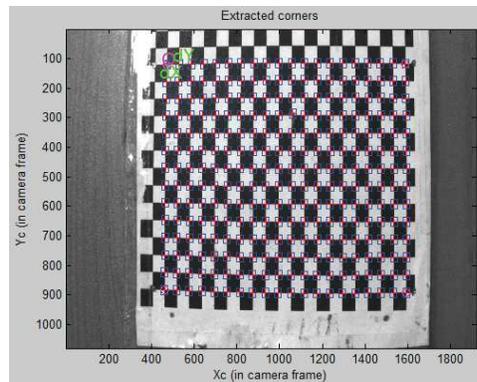
**Figura 8. Imágenes del patrón de calibración.**

En la figura 8 se observa cómo se obtienen las imágenes del patrón, de modo que, se debe indicar a la herramienta el nombre de la imagen y su ubicación dentro del módulo de la memoria de la computadora.

Una vez realizada la identificación de las imágenes del patrón, se definen los límites de la cuadrícula del patrón de calibración en cada una de las imágenes tomadas, además de su punto de origen como se observa en la Figura 9. Luego se digitan las dimensiones de los valores en milímetros que tiene cada cuadro del patrón, es decir, los valores en **X – Y**. Para este caso se usó un patrón de calibración de 5x5 mm. Con estos datos digitados, la herramienta detecta los vértices de cada cuadro como se ilustra en la Figura 10.



**Figura 9. Límites de la cuadrícula.**



**Figura 10. Detección de los vértices del patrón.**

Realizada la detección de los vértices del patrón de calibración, la herramienta arroja los parámetros de calibración que más se ajustan a la geometría del sistema, estos se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Parámetros de calibración.**

Parámetro	Variable	Valor
Longitud focal	fc	[ 2852.10; 2855.74]
Punto Principal	cc	[ 984.32; 439.70]
Coefficiente de Inclinación	Alpha_c	0
Coefficiente de Distorsión	kc	[ -0.34; 0.19; 0; 0; 0]
Incertidumbre de longitud focal	fc_error	[ 6.21; 6.01]
Incertidumbre del Punto Principal	cc_error	[ 7.97; 5.94]
Incertidumbre del coeficiente de inclinación	alpha_c_error	0
Incertidumbre de los coeficientes de distorsión	kc_error	[ 0; 0.10; 0; 0; 0]

Con base en los parámetros antes mostrados, se procede a obtener los valores intrínsecos calculados para las 8 imágenes, estos se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2. Parámetros Intrínsecos.**

Parámetros Intrínsecos	Variable	Valor
Indicador de estimación de las dos variables focales	est_fc	[1; 1]
Indicador de estimación de la relación de aspecto $fc(2) / fc(1)$	est_aspect_ratio	1
Indicador de estimación del punto principal	center_optim	1
Indicador de estimación del coeficiente de inclinación	est_alpha	0
Indicador de estimación de los coeficientes de distorsión	est_dist	[1;1;1;1;0]

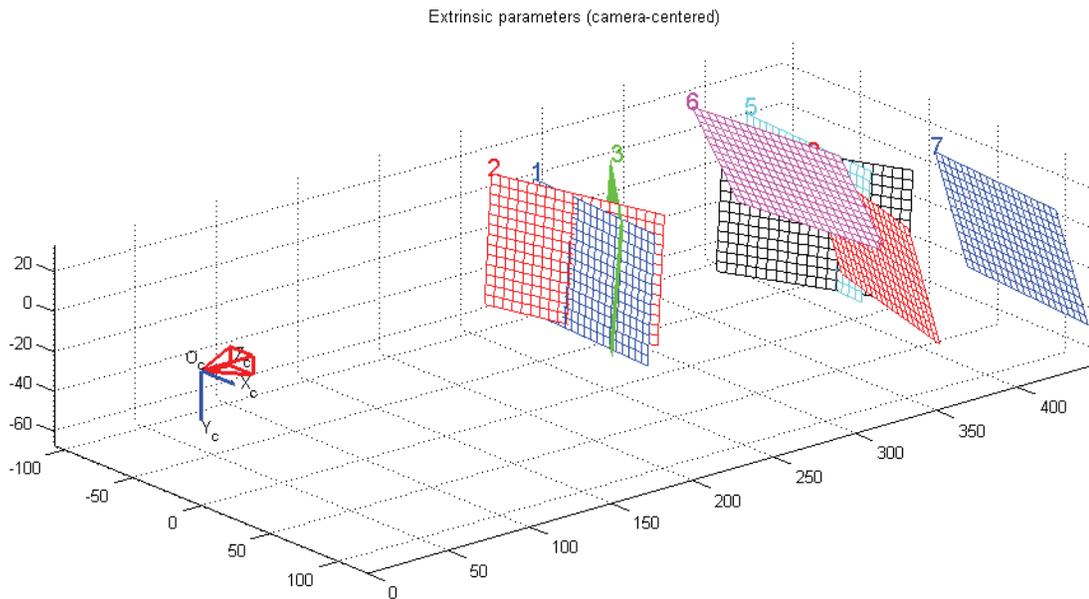


Además de los parámetros intrínsecos, también se calcularon los parámetros extrínsecos, los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3. Parámetros extrínsecos.**

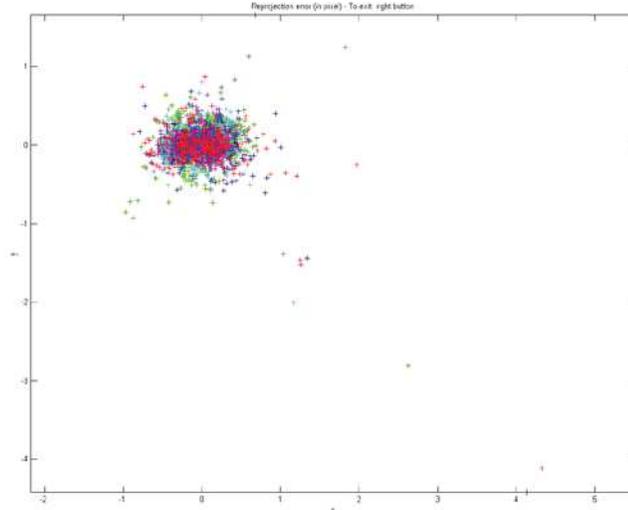
Parámetros Extrínsecos	Variable	Valor
Rotación	omc_1	[ 2.21; 2.; -1.35]
Traslación	Tc_1	[ -4.38; -2.74; 2.41]
Error de rotación	omc_error_1	[ 1.70; 1.81; 3.84]
Error de translación	Tc_error_1	[ 6.75; 5.02; 5.52]

Además de los valores extrínsecos, la herramienta proporciona la posición relativa de los patrones de calibración con respecto a la cámara, donde el prisma en color rojo representa a la cámara y las cuadrículas de colores son los patrones de calibración en distintas posiciones, ver Figura 11.



**Figura 11. Posición relativa de los patrones de calibración con respecto a la cámara.**

Otro parámetro importante que se obtiene del proceso de calibración es el error de proyección el cual se muestra en la Figura 12. Este representa el error obtenido en el cálculo de los parámetros, dando como resultado un rango de  $\pm 1$  milímetro de error.



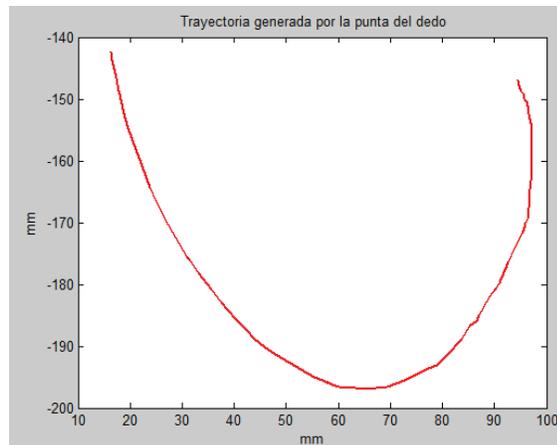
**Figura 12. Error de proyección.**

Con base en los datos obtenidos en el proceso de calibración, se procede a dimensionar los datos de la Figura 5, con el objetivo de conocer la trayectoria que genera la punta del dedo índice en milímetros. En la ecuación (1) se muestra la contante de calibración y mediante la ecuación (2) se evalúan cada uno de los puntos que corresponden a la trayectoria.

$$ct = (fc, cc, Tc\_1) \tag{1}$$

$$TR = (ct) [(y(c), x(c), 0, fc, cc, omc\_1, Tc\_1)] \tag{2}$$

Resolviendo la ecuación (2) para cada uno de los puntos que componen la trayectoria y teniendo en cuenta las variables calculadas en el proceso de calibración, se obtiene la gráfica en milímetros de la trayectoria que genera el dedo índice, ver Figura 13.



**Figura 13. Trayectoria generada por la punta del dedo índice.**

El trabajo presentado en [11] propone el diseño de un mecanismo capaz de reproducir la trayectoria que generan los dedos largos de la mano. A continuación, se describe el mecanismo propuesto.

## 4. Validación del mecanismo rehabilitador

Se compara la trayectoria que genera el mecanismo rehabilitador con la del dedo índice, teniendo en cuenta que tienen el mismo sistema de unidades.

### 4.1 Descripción del mecanismo

El sistema está compuesto por cuatro mecanismos de cuatro barras tipo manivela - corredera para la movilización de los dedos índice al meñique. El Mecanismo de cuatro barras **R-RRT** tipo manivela corredera con un grado de libertad es capaz de reproducir la trayectoria que genera la punta de cada uno de los dedos largos de la mano. En la Figura 14 se observa el mecanismo propuesto.

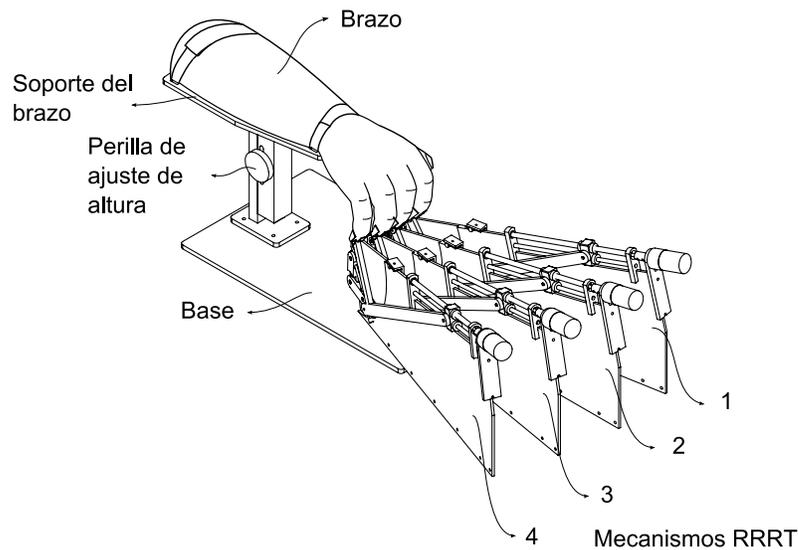


Figura 14. Mecanismo propuesto.

La síntesis de los mecanismos flexo-extensores se realizó a partir de un método de generación de trayectoria con tres puntos de precisión con base en las curvas del eslabón acoplador [12]. Una restricción importante es que la longitud de la extensión del eslabón acoplador sea siempre mayor o igual a la longitud máxima de la manivela; lo anterior para evitar que la unión del dedo del usuario y el mecanismo choquen.

El mecanismo de rehabilitación cumple con la función de movilizar las articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas proximal y distal de los dedos índices al meñique. Este movimiento lo realiza mediante la orientación del extremo distal de cada dedo por la trayectoria natural de Flexoextensión. Lo anterior cumple con el objetivo de evitar que el movimiento del dedo se realice fuera de su espacio de trabajo.

Los ejercicios que puede ofrecer el mecanismo para movilizar los dedos son de tipo pasivo y activo, es decir, el mecanismo tiene la capacidad de ejercer fuerza de movilidad hacia el dedo esto para el caso de pasivo, para el caso de activo, el paciente puede agregar fuerza para generar el movimiento de Flexoextensión.

### 4.2 Generación de trayectoria

La trayectoria está definida por el límite de flexión hasta el límite de extensión, durante este trayecto se reproduce el movimiento de Flexoextensión. Los movimientos seguros, suaves y continuos

en el tiempo, se realizan mediante la adquisición de señales proporcionadas por encoders incrementales anclados a los motores y tarjetas de adquisición de datos. En la Figura 15 se observa el esquema del mecanismo.

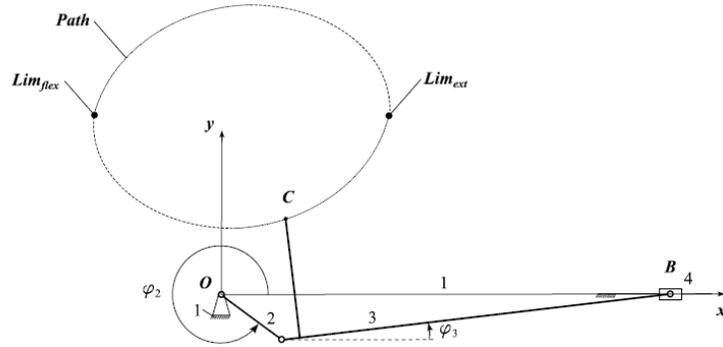


Figura 15. Esquema del mecanismo propuesto.

En la Figura 15 de ilustran los límites de flexión y extensión que puede genera el mecanismo sin provocar problemas de hiperextensión. Es importante tener en cuenta que para movilizar cada uno de los dedos de la mano, se debe analizar el ángulo que genera la manivela y la distancia recorrida por la corredera. Esto con el objetivo de verificar en los métodos de simulación el correcto funcionamiento del mecanismo.

En la Figura 15 se observa el desplazamiento que realiza el efector final, con el objetivo de reproducir el movimiento de Flexoextensión. Teniendo en cuenta que **el mecanismo tiene la capacidad de adaptarse al tamaño de los dedos largos mediante el ajuste de uno de sus eslabones**, esto implica que tiene un espacio de trabajo máximo y mínimo.

Para realizar la validación del dispositivo se grafica el rango de trabajo del mecanismo junto con la trayectoria que genera el dedo índice de forma natural, el resultado se muestra en la Figura 16.

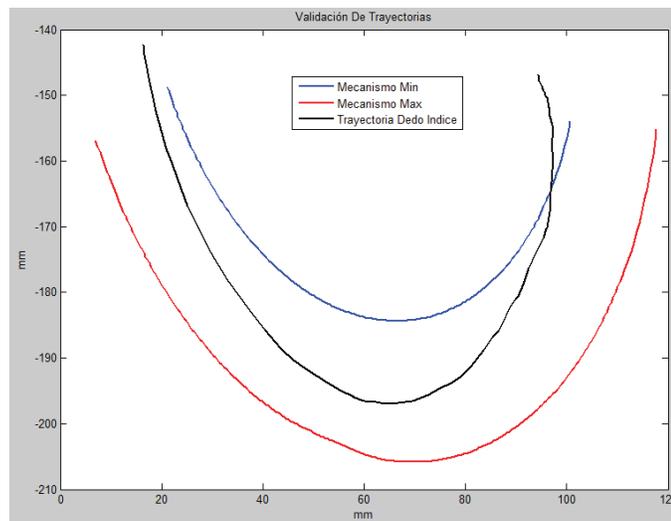


Figura 16. Validación de trayectorias



En la Figura 16 se observa que la trayectoria que genera el dedo índice de forma natural está dentro del espacio de trabajo del mecanismo en su totalidad. Sin embargo, al terminar el movimiento de extensión a flexión la trayectoria del dedo se sale del espacio de trabajo en  $\pm 4$  mm en los ejes x-y.

## 5. Conclusiones

Se realizó el correspondiente análisis de imagen, así como la validación de las trayectorias correspondientes, obteniendo resultados que confirman el correcto funcionamiento del mecanismo. A través del método de Heikkila se obtuvo un error prácticamente nulo, debido al modelado de la distorsión, imágenes libres de ruido y de los parámetros de identificación. El método aplicado se caracteriza por ser de bajo costo y de alta confiabilidad.

Teniendo en cuenta el trabajo realizado en este documento, se tiene el objetivo de aportar un mejor desarrollo, seguro y confiable durante las terapias de rehabilitación de dedos de la mano, por tanto, el mecanismo presentado fue diseñado con el propósito de generar los movimientos naturales de Flexoextensión de los dedos de la mano. Además, está caracterizado por que puede ser reconfigurable para distintos tamaños de los dedos, esto representa gran ventaja frente a los dispositivos que se encuentra actualmente en el mercado.

Otra ventaja está relacionada en la forma de la trayectoria que genera, ya que los mecanismos que están en el mercado, estos se basan en generar trayectorias lineales, que comparadas con la trayectoria que se presenta en este documento, se llegó a la conclusión que no coincide. De modo que, el mecanismo propuesto tiene la capacidad de generar una trayectoria elíptica, esto implica realizar la validación en un trabajo a futuro, la cual demostrará el error de seguimiento de la trayectoria generada por el mecanismo y la del dedo de la mano.

Es importante enfatizar que el sistema debe ser usado bajo estricta supervisión de un fisioterapeuta o personal médico capacitado, ya que dependiendo del diagnóstico del especialista se pueden definir los grados de movilidad que el paciente requiere para su proceso de evolución.

El trabajo a futuro estará basado en conocer las trayectorias que generan de forma natural los dedos medio, anular y meñique. De igual manera, conocer las trayectorias que generan los mecanismos correspondientes para los dedos antes mencionados, con el objetivo de validar si las trayectorias generadas por los dedos están dentro del espacio de trabajo del dispositivo rehabilitador.

Además, se debe diseñar e implementar un sistema de seguridad, el cual detenga el mecanismo teniendo en cuenta el dolor del paciente, esto con el objetivo de no generar una lesión adicional al paciente. Se ha pensado en la adquisición de señales electromiográficas, estas se obtienen por medios superficiales mediante electrodos.

## Referencias

- [1] Pascual, J. *“Rehabilitación de la mano”*, Universidad de ciencias Médicas de Guantánamo, páginas 17, 2014.
- [2] Kapandji, A. *“Fisiología articular: esquemas comentados de la mecánica humana”*, Editorial Médica Panamericana, ed. Madrid, 2006.
- [3] Zapatero, A.; Rodríguez, J.; Aguilar, J.; Castillo, E. *“Dispositivo Robótico Coadyuvante para la Rehabilitación de Dedos de la Mano”*, Asociación Mexicana de Mecatrónica, A. C. páginas 211-220, 2016.
- [4] Soto, M.; Jimmy W.; Gini, G. *“Robotic Hands: Design Review and Proposal of New Design Process”*, Proceedings of the World Academy of Science: Engineering and Technology, 2017.
- [5] Gorgues, J. *“Ortesis para los dedos de la mano”*, COF de valencia, volumen 28, numero 2, 2009.
- [6] González, M. *“Evaluabilidad de los programas del robot amadeo en la rehabilitación de la mano del hemipléjico”*, TOG (A Coruña), páginas 1-20, 2014.



- [7] Chang, C.; Lange, B.; Zhang, M. "*Towards Pervasive Physical Rehabilitation Using Microsoft Kinect*", National Institute on Disability and Rehabilitation Research, Rehabilitation Engineering Research, Center, RERC, 2012.
- [8] Hoyos, J.; Cardona, J.; Capacho, L. "*Técnicas de Calibración de Cámaras para visión estéreo y reconstrucción*", XV Simposio de tratamiento de señales, imágenes y visión artificial – STSIVA, 2010.
- [9] Schneider, A.; Rasband, W.; Eliceiri, K. "NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis", *Nature methods* 9(7): 671-675, PMID 22930834, on Google Scholar, 2012.
- [10] Pizarro, D.; Campos, P.; Tozzi, C. "*Comparación de técnicas de calibración de cámaras digitales*", *Rev. Fac. Ing. - Univ. Tarapacá*, vol. 13 no. 1, páginas 57-67, 2005.
- [11] Aguilar, j. "*Sistema robótico para asistencia en terapias de rehabilitación de movimientos de la mano*", posgrado en tecnología avanzada, Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Querétaro, 2014.
- [12] Norton, R. "*Design of Machinery: An Introduction to the Syntesis and Analysis of Mechanisms and Machines*", (MacGraw Hill, Ed.) (5ª. Ed.), 2012.



# Plataforma electrónica para el acceso a edificios y/o casas mediante código QR encriptado.

Troncoso-Ramos Jonathan Armando<sup>1</sup>, Rodríguez-Reséndiz Juvenal<sup>2</sup>, Pedraza-Ortega Jesús Carlos<sup>2</sup>, Ramos-Arreguín Juan Manuel<sup>2</sup>.

Universidad Autónoma de Querétaro

<sup>1</sup>Facultad de Informática

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería

## Resumen

*En el presente artículo se describe la implementación de un algoritmo de encriptación basado en permutación de elementos usando un código QR (Quick Response) para la gestión de acceso al personal autorizado, utilizando las capacidades que ofrece un sistema embebido. Los sistemas embebidos basados en arquitectura ARM (Advanced RISC Machine), poseen características que los convienen en soluciones muy robustas, tales como poco consumo energético, escalables, y una alta disponibilidad de librerías de uso libre para el desarrollo de soluciones. El algoritmo se gestionó a partir del lenguaje de programación Python utilizando OpenCV (Open Source Computer Vision Library), lo cual hace posible la lectura del código QR, permitiendo o denegando el acceso según sea el caso. Se realizaron pruebas con la finalidad de medir el progreso en cada etapa de desarrollo hasta llegar al sistema final, el cual cuenta con un interfaz gráfico diseñado en Python con una administración centralizada para la gestión eficiente de usuarios, consultas de registros y acceso al sistema de encriptación de una manera simple, lo anterior permite una rápida respuesta del algoritmo en su validación de información para denegar o conceder el acceso al personal interno dentro de las instalaciones.*

**Palabras clave:** encriptación, código QR, OpenCV, sistemas embebidos, Python, ARM.

## 1. Introducción

Actualmente existe una amplia gama de sistemas de seguridad comerciales que permiten gestionar el acceso a edificios de manera precisa, mediante el uso de tarjetas inteligentes, contraseñas ingresadas desde un panel hasta reconocimiento de huella dactilar, sin embargo, el avance tecnológico proporciona herramientas más completas que permiten al atacante robar los datos de los usuarios del sistema. Citado lo anterior las necesidades de la sociedad han cambiado con el paso de los años, lo que ha generado el desarrollo de soluciones a partir de nuevas tecnologías y algoritmos que permiten la implementación de sistemas de seguridad robustos, brindando mayores características de protección a los datos de los usuarios.

El sistema de seguridad propuesto en el presente trabajo incorpora un algoritmo de encriptación basado en permutación de elementos en un código QR desarrollado en una plataforma embebida con arquitectura ARM, en conjunto con una cámara, permite resolver deficiencias en el almacenamiento de los datos de los usuarios, así como el aprovechamiento de los recursos para un acceso eficiente en el lugar designado que se desee instalar.

La principal ventaja de utilizar un código QR con texto cifrado, radica en que la información siempre estará protegida ante posibles ataques externos, permitiendo que los datos puedan ser exclusivamente leídos de manera correcta, la cámara en conjunto con el algoritmo verificará al usuario que intenta acceder para conceder el permiso o denegarlo según sea el caso. Programando más casos críticos de riesgo que impidan el robo de datos de los usuarios del sistema, como el cifrar los datos almacenados,



llevar un control de los usuarios registrados, gestión centralizada desde un panel de administrador; con la finalidad de proporcionar mayor panorama ante las situaciones de vulnerabilidad del sistema que puede generar un atacante; poniendo medidas más fuertes de seguridad que impidan el cumplimiento del objetivo por parte del atacante tales como; obtener los datos para usos no autorizados o entrar de manera no permitida a las instalaciones.

## 2. Sistemas de seguridad

Uno de los retos más importantes que actualmente enfrentan las autoridades y sociedad es la violencia y la seguridad, como antecedente de ello se encuentra el nivel de percepción de la población sobre este tema en las entidades federativas referida en la Encuesta Nacional de Victimización y Percepción sobre Seguridad Pública (ENVIPE), publicada el 30 de septiembre de 2014, reportando un incremento en la percepción de la inseguridad en este año del 73.3%, frente al 72.3% del año pasado. En el Estado de Querétaro, las cifras reportadas por el Sistema Nacional de Seguridad indican un incremento constante en la incidencia delictiva pues de 26,032 delitos registrados por las autoridades en el año 2012 se proyecta que al final de este año ascienda a 30,942 ilícitos, destacando por su número los robos y las lesiones. Atendiendo su objetivo de atender las necesidades sociales, es fundamental que la investigación científica y el desarrollo tecnológico, presenten soluciones capaces de resolver los problemas que nos aquejan como sociedad, teniendo como principal objetivo las instituciones públicas de educación superior. Lo anterior tiene como marco normativo el Plan Nacional de Desarrollo (PDN) 2013-2018, teniendo entre sus objetivos hacer del desarrollo científico, tecnológico y la innovación pilares para el progreso económico y social sostenible. Por su parte, el Programa Especial de Ciencia y Tecnología e Innovación 2014-2018 establece a la seguridad ciudadana como tema prioritario para el Sector de Ciencia, Tecnología e Innovación; a su vez, el Plan Querétaro 2015 incluye entre sus grandes ejes de desarrollo, la Seguridad y Estado de Derecho y alineado a los grandes ejes de desarrollo el Programa Estatal de Ciencia y Tecnología 2010-2015, en su objetivo estratégico 4 determina el promover la aplicación del conocimiento científico y tecnológico a la solución de problemas específicos del sector productivo y social, que contribuyan al desarrollo sustentable del estado. Analizando las causas básicas de una determinada amenaza, la seguridad humana identifica los cambios estructurales, internos o externos, y los de comportamiento que se necesitan para mitigar sus consecuencias, y en la medida de lo posible evitar que se vuelvan a repetir en un futuro.

La biometría es usada para muchos propósitos, tales como la detección de criminales, identificación, el control de acceso entre otros [1]. Las características biométricas se pueden dividir en dos clases principales [2]:

- a) Fisiológicas: Relacionado con la forma del cuerpo y que varía de persona a persona con respecto a los diferentes rasgos físicos, citando ejemplos como: la forma del cuerpo, forma del rostro, geometría de la mano, reconocimiento de iris.
- b) Comportamiento: Están relacionados con el comportamiento de la persona, algunos ejemplos de este caso son: la firma, dinámica de pulsaciones de teclas.

Uno de los problemas de seguridad que presentan los sistemas de autenticación biométrica es el robo de identidad, que es consecuencia del almacenamiento de las plantillas (remota o localmente) dentro del sistema, siendo principal objetivo de los atacantes, una solución a este tipo de vulnerabilidad es el cifrado de la plantilla antes de su almacenamiento o transmisión a través de un canal inseguro [3].

Los sistemas caóticos poseen características como ergodicidad, diversidad de datos, sensibilidad a condiciones iniciales, parámetros de control, compartibles con propiedades criptográficas tales como permutación, difusión, secuencia pseudoaleatorias y complejidad del sistema base, permitiendo desarrollo en cifrado de imagen [3].

El término criptografía proviene de dos vocablos griegos: criptos que significa oculto o escondido y grafos, que significa escritura. A partir de la definición anterior, la criptografía tiene como estudio la escritura oculta. Específicamente, la criptografía transforma un mensaje con significado pleno usando claves o cifras que ocultan el verdadero significado de este. Uno de los objetivos de la criptografía es la protección de la información dado que actualmente los ataques tienen como objetivo la obtención de



datos relevantes, el atacante se vale de una serie de técnicas, herramientas que le permitan descifrar el mensaje y hacerse de la información, teniendo como necesidad el diseño de algoritmos robustos que permitan elevar el grado de seguridad en datos sensibles para evitar ataques que terminen en pérdidas masivas de información [4].

La eficiencia de los sistemas de seguridad radica en el número de casos de riesgos que puedan abarcar para evitar que el atacante obtenga información o pueda acceder de manera no autorizada para cometer actos ilícitos en el espacio asignado, llevando al desarrollo de nuevas soluciones basadas en las tecnologías de la información como la implementación de algoritmos basados en métodos criptográficos; permitiendo la codificación y cifrado de la información de los usuarios del sistema. El sistema de seguridad presentando en este artículo tiene como prioridad el cuidado de la información de los usuarios del sistema, tomando como fundamentos estudios y análisis de algoritmos de cifrado para gestionar el acceso mediante el uso de un código QR, abarcando más casos de riesgos y brindando mayor grado de protección al entorno donde opera el sistema.

La transposición es una de las dos grandes técnicas de transformación de texto plano. En una transposición las letras del texto plano se mezclan o desordenan siguiendo un determinado algoritmo para obtener un anagrama. Un anagrama se presenta cuando una palabra tiene las mismas letras con el mismo número de apariciones, pero en un orden diferente. Por ejemplo, el criptograma OTERCES es una de las  $7! = 5040$  transposiciones o anagramas posibles del texto plano secreto, en este caso el resultado del algoritmo es poner al revés la palabra [4].

Una de las principales desventajas de utilizar este método radica en la longitud del texto que se quieren cifrar, en este caso si la cadena de texto plano legible es corta, se puede descifrar la palabra de manera relativamente rápida y sencilla dado que los escenarios ante las combinaciones posibles no son demasiadas; por otro lado si el texto tiene una longitud considerable el método de cifrado por transposición se vuelve muy viable dado que las combinaciones posibles aumentan radicalmente, y resulta prácticamente imposible descifrar sino se tiene la clave, llave o el protocolo correcto.

Una de las técnicas más usadas para el cifrado de texto plano es la sustitución, respetando la posición de cada letra de la cadena de texto, pero cada letra es sustituida en su posición por otra de un alfabeto propuesto haciendo que el texto cifrado no sea legible y carezca de sentido sino se tiene la clave o llave necesaria para descifrar el texto. Es un método de cifrado bastante eficiente para cadenas de texto cortas dado que si se aplica un análisis estadístico y se encuentra cierto comportamiento o patrón se puede descifrar el texto con facilidad y hacerse de la información se tenga o no permiso de acceso a ella.

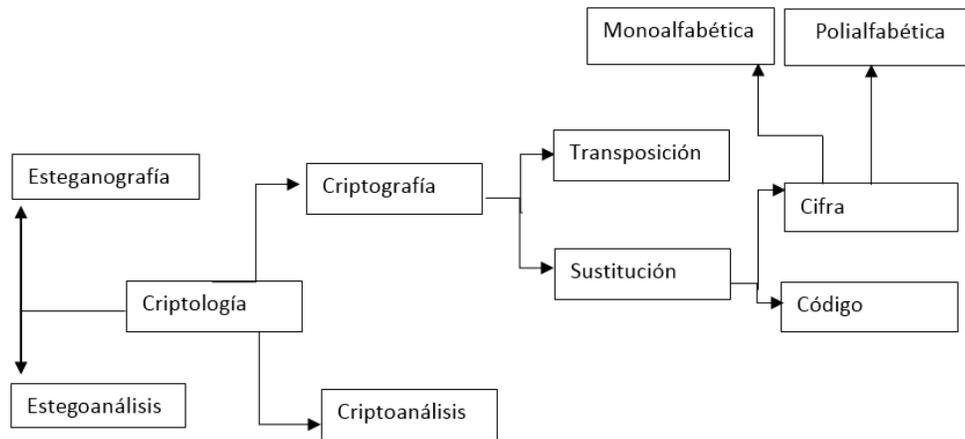
Los alfabetos de sustitución propuestos son la base para la formación de anagramas para el proceso de cifrado de texto a continuación se muestra un ejemplo:

Alfabeto plano: a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w y z

Alfabeto B: Z X C V B N M A S D F G H J K L P O I U Y Q W E R T

Como se mencionó anteriormente se puede aplicar un análisis estadístico que de pauta de la asignación del alfabeto plano al alfabeto B en cada posición correspondiente, para dificultar más que el atacante tenga la llave que le permita descifrar el texto, adicionalmente al alfabeto propuesto se le agregan símbolos los cuales hacen más complicado adivinar el patrón de cada posición del texto original, a este tipo de sustitución se le conoce como homófona. Los métodos en los que solo se emplea un alfabeto de sustitución se denominan monoalfabéticos, por otro los que utilizan dos o más alfabetos se les denominan polialfabéticos.

En la Figura 1 se muestra los campos de estudio de la criptografía, así como una breve clasificación, ejemplificando el contexto de su evolución hasta llegar a lo que hoy conocemos como criptografía y su alcance con los métodos de cifrado más usados.



**Figura 1. Ciencia del estudio de la escritura secreta y sus campos.**

## 2.1 Algoritmo cifrado de texto

El proceso de cifrado contempla en primer lugar la creación de una plantilla cifrada de una plantilla clara, utilizando un algoritmo basado en la arquitectura de permutación-difusión (modificación de posición-valor) mediante secuencias caóticas del mapa logístico. El procedimiento de cifrado considera como plantilla clara  $P \in [0,255]$  con una longitud de  $l = 2072$  (bytes). Por otro lado, el mapa logístico puede ser descripto por la ecuación (1) [2]:

$$x_{i+1} = ax_i e^{1-x_i} \quad (1)$$

En donde  $x_i \in (0,1)$  representa el estado del sistema  $a_0 \in (0,1)$  es la condición inicial y  $a \in (3,994)$  el parámetro de control para genera secuencias aleatorias (caos) y descartar ventanas periódicas. Los sistemas caóticos al igual que el mapa logístico tienen una desventaja para su implementación en sistemas de cifrado tales como rasgos caóticos discontinuos, distribución no uniforme, prioridad y espacio de llaves reducido, por otra parte, las ventajas son la simple estructura lo que facilita su implementación y la alta tasa de salida.

A continuación, se enlistan los pasos que engloban el proceso de generación de un sistema cifrado:

- Se establece un rango de 128 bits (32 caracteres hexadecimales)
- $K \in [0-9, A-F]$  para generar secuencias caóticas en dos mapas logísticos a partir de los siguientes parámetros de entrada:
  - i) 32 dígitos para la llave secreta
  - ii) Parámetros de control  $H_1, H_2, \dots, H_{32}$  donde  $H \in [0-9, A-F]$

Obteniendo los datos necesarios se plantean las ecuaciones (2), (3), (4) y (5) tomando el rango de los parámetros de control:



$$\frac{(H_1, H_2, \dots, H_8)10}{2^{32} + 1} \quad (2)$$

$$\frac{(H_9, H_{10}, \dots, H_{16})10}{2^{32} + 1} \quad (3)$$

$$\frac{(H_{17}, H_{18}, \dots, H_{24})10}{2^{32} + 1} \quad (4)$$

$$\frac{(H_{25}, H_{26}, \dots, H_{32})10}{2^{32} + 1} \quad (5)$$

Las ecuaciones anteriores representan el proceso de generación de la llave secreta. Para la distribución de la llave secreta en los mapas logísticos pueden ser descriptos con las ecuaciones (6), (7), (8) y (9).

$$\alpha_1 = 3999 + (\alpha_1 * 0.001) \quad (6)$$

$$\alpha_1 = (A + B + Z) \text{ mod } 1 \quad (7)$$

$$\alpha_2 = 3999 + (\alpha_2 * 0.001) \quad (8)$$

$$\alpha_2 = (A + B) \text{ mod } 1 \quad (9)$$

En el caso para las variables  $\alpha_1$  representan al mapa logístico 1 y  $\alpha_2$  representan al mapa logístico en el proceso de distribución.

Tomando lo anterior como antecedente para la generación del algoritmo a implementar se consideró una muestra inicial de 26 elementos cada uno de ellos con un valor posicional clave para la iteración en un mapa logístico propuesto de elementos de la misma cantidad que la muestra inicial. El análisis de componentes principales es útil cuando se hayan obtenidos datos de un número de variables, en donde se creen que hay alguna redundancia en esas variables, la redundancia significa que algunas de las variables son correlacionadas entre sí, reduciendo la muestra inicial a 26 elementos de entrada para la generación del criptograma [5]. El algoritmo itera elementos obteniendo su equivalente en base a sus posiciones y operaciones mencionadas anteriormente, en la Figura 2 muestra el diagrama de flujo que describe el proceso de encriptación y des-encriptación desarrollado:

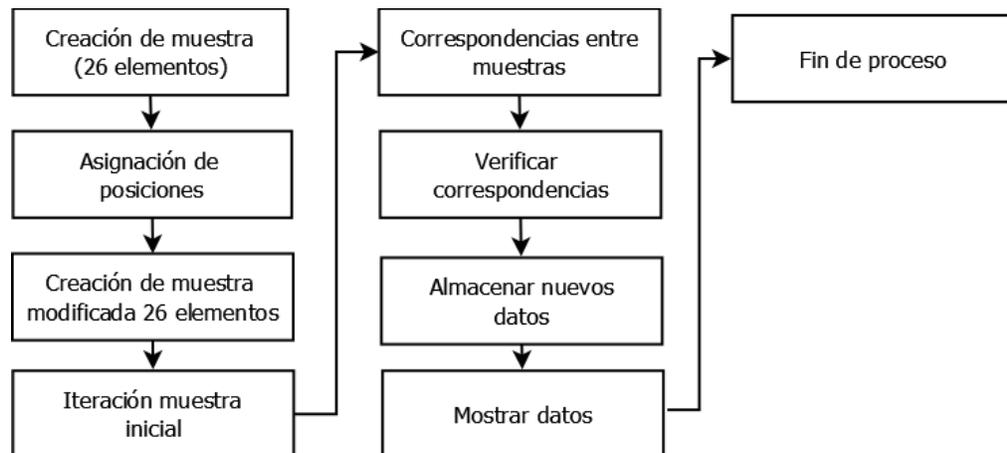


Figura 2. Diagrama proceso de encriptación.



### 3. Sistemas embebidos basados en arquitectura ARM

Se puede definir como sistema embebido a un sistema electrónico que tiene como fin el realizar una(s) tareas específicas para un fin deseado. Los sistemas embebidos pueden incluir elementos de hardware y software que contribuyan a la realización del fin propuesto [6].

En la actualidad, estamos en constante interacción con los sistemas embebidos sin saber que lo son, desde el celular que utilizamos, televisión, lavadora, etc. Los sistemas embebidos conforman una gran parte del desarrollo tecnológico, así como aportan soluciones a la vida cotidiana de la sociedad, aprovechando todos los recursos para obtener una gran eficiencia en los procesos asignados.

Los sistemas embebidos difieren un poco de los demás porque sus interfaces están directamente relacionados con el hardware del dispositivo, además de llevar un control de los recursos que se utilizan por operación lo cual los hace más eficientes y con menor consumo energético. Este tipo de sistemas pueden ejecutar operaciones de manera eficiente, manejando tiempos de respuesta sumamente rápidos de procesamiento. Sin embargo, son sistemas que requieren de personal capacitado para desarrollarlos o brindar mantenimiento según sea el caso.

En la actualidad la industria electrónica innova y presenta nuevas soluciones tecnológicas, demandando desarrollos más complejos en lapsos de tiempo más cortos, optimizando recursos y diseñando nuevas arquitecturas adaptables a las tecnologías de última generación. La implementación de los dispositivos programables trajo un cambio significativo al integrar hardware y software en componentes capaces de ser reconfigurables, sin perder características como la eficiencia energética, costo, y robustez [6].

En 1983 Acorn Computers Ltd comenzó la investigación de una nueva arquitectura el cual sería un procesador con un juego reducido de instrucciones (RISC). El diseño fue finalizado en el año de 1985, al que llamaron ARM1 (Acorn RISC Machine 1), este modelo contaba con 25000 transistores sin embargo fue sustituida rápidamente un año después por la versión mejorada ARM2, contaba con un bus de datos de 32 bits con un espacio de direcciones de 26 bits, junto con 16 registros de 32 bits. Eventualmente se consiguieron mejoras en los modelos como el ARM3 en 1990 logrando latencias de 25 Mhz, hasta llegar al modelo ARM6 que contaba con 35000 transistores mejorando la administración de los periféricos integrados, pero fue el diseño del procesador ARM7DMI el que marco un cambio significativo en el desarrollo tecnológico para la arquitectura ARM [7].

La arquitectura de 32-bits de ARM es la más utilizada por los dispositivos móviles hoy en día, existiendo variantes de procesadores de la gama Cortex, los cuales son diseñados para diferentes aplicaciones.

- i) Cortex-A: Diseñados para aplicaciones.
- ii) Cortex-R: Diseñados a sistemas en tiempo real y empotrado (embebido).
- iii) Cortex-M: Diseñados a micro-controladores empotrados (embebido).

ARM se puede definir como una máquina con un conjunto de instrucciones reducidas que incorpora las siguientes características:

- i) Un fichero de registro único.
- ii) Arquitectura de load/store donde las operaciones de procesamiento de datos solo operan en los contenidos de los registros y no directamente en la memoria.
- iii) Instrucciones simplificadas y reducidas para la decodificación de instrucciones.
- iv) Control de ALU (Arithmetic Logic Unit) y decodificador de instrucciones.
- v) Auto-incremento y decrementos de direccionamiento para optimización de bucles.

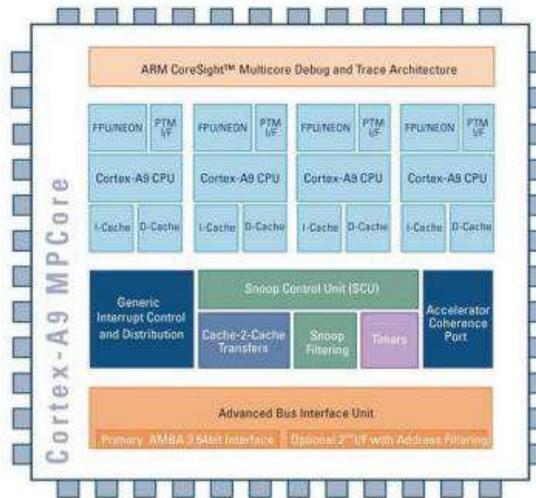


Figura 3. Diagrama de un procesador ARM de 4 núcleos.

En la Figura 3 podemos apreciar la distribución de la arquitectura que conforma un procesador ARM Cortex de 4 núcleos, con ello se puede comprender más de la potencia de cómputo bruto que puede ofrecer una tarjeta electrónica basada en esta arquitectura para el desarrollo de un sistema embebido dedicado a la seguridad el cual estará en funcionamiento en tiempo continuo y estará realizando múltiples tareas a la vez.

#### 4. Metodología

La metodología propuesta se presenta en la Figura 4. Donde se considera como primera etapa el análisis de longitud de la cadena de texto, así como la evaluación de caracteres especiales, una vez obteniendo los resultados se propone en la segunda etapa permutaciones a cada elemento de la cadena de texto teniendo un panorama amplio de los patrones característicos de cada permutación. En la tercera etapa se comienzan a realizar pruebas de lectura del código QR con resoluciones soportadas por la cámara, permitiendo conocer las distancias ideales entre el código QR y el lente de la cámara para la búsqueda de correspondencias de puntos discretos en la imagen, los cuales podemos denominar como puntos de interés, seleccionados en ubicaciones distintivas de la imagen y obtener con la mayor precisión posible el texto [8].

En la cuarta etapa se incorporó el texto cifrado en el código QR para su lectura y se obtuvieron las primeras lecturas para poder recuperar la cadena original, en este caso el nombre del usuario que se otorgó permiso de acceso a la instalación, siguiendo los principios de reconocimiento facial que significa dar una imagen del código QR, requiriendo que el sistema determine si es el usuario autorizado o no para el acceso [9], se evaluó casos en donde la lectura no era óptima y se mejoró el algoritmo hasta conseguir una eficiencia de respuesta de lectura y activación del hardware para gestionar el acceso. La verificación de cada cadena cifrada de texto se comprobaba con la base de datos, aplicando otro filtro de seguridad encontrando correspondencias entre lo almacenado y lo que se recibía por el código QR [10]. Por último, se realizaron pruebas del sistema final, en busca de errores para ser corregidos antes de su implementación final en el espacio asignado.

Teniendo como contexto la metodología dividida en etapas, cada una cuenta con subprocesos para garantizar la mayor eficiencia en relación entre el software y el hardware, en cada una de las etapas se implementaron pruebas las cuales consistían en la corrección de errores, bugs para realizar las adecuaciones pertinentes con la finalidad de que el software final no tuviera problemas de seguridad los cuales pueden ser explotados por el atacante para el robo de información o acceso no permitido. Una de las ventajas de separar la metodología en etapas radica en el mantenimiento del sistema total, con ello se puede detectar de manera más precisa la falla para ser atendida, sin afectar completamente el funcionamiento del sistema.

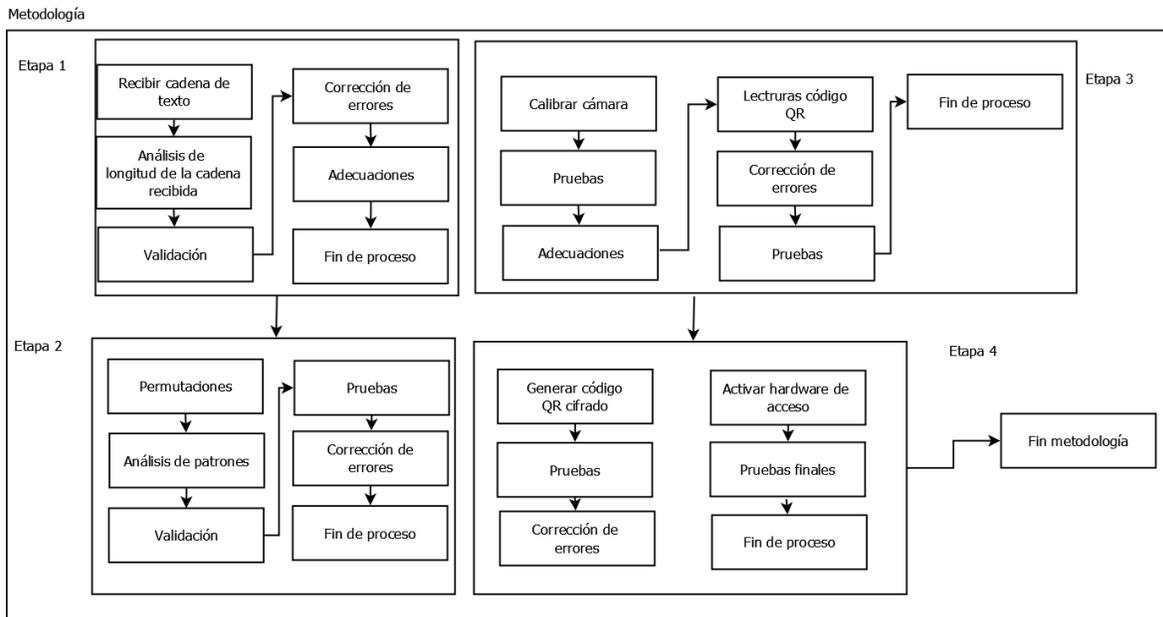


Figura 4. Metodología propuesta.

## 5. Pruebas y resultados

Se realizaron pruebas y análisis en cada una de las etapas propuestas en la metodología, en la Figura 5 se muestra un diagrama de flujo que plantea los pasos de desarrollo del sistema final. Cada proceso permitió depurar errores de compilación, así como verificar los recursos que se estaban ocupando en el procesamiento del algoritmo de encriptación final, dado que se buscaba una rápida respuesta para gestionar el acceso de manera rápida para los múltiples usuarios que requieren acceso a las instalaciones, cuidando un rendimiento entre la parte del software y el hardware.

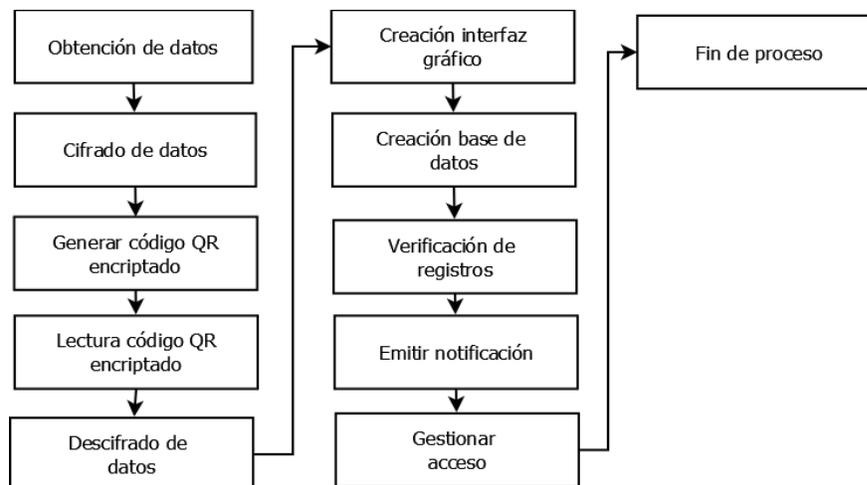


Figura 5. Secuencia de pasos del desarrollo del sistema final.



En la Figura 6 se muestra el proceso de lectura del código QR, modificando las resoluciones de la cámara tomando tiempos de respuesta de la lectura del código cifrado, con ello se buscó la resolución más óptima para la lectura. El código QR toma la cadena de texto cifrado, la cámara lee los datos, aplicando filtros y el proceso de descifrado se obtiene una cadena de texto la cual se verifica en la base de datos su existencia, mostrando en la pantalla quién está intentando entrar a las instalaciones.

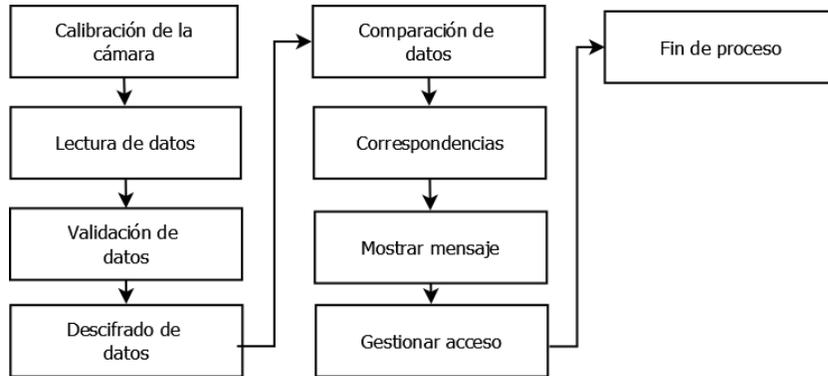
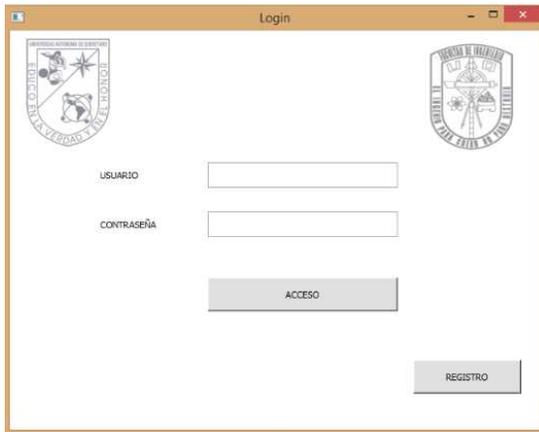


Figura 6. Lectura del código QR cifrado.

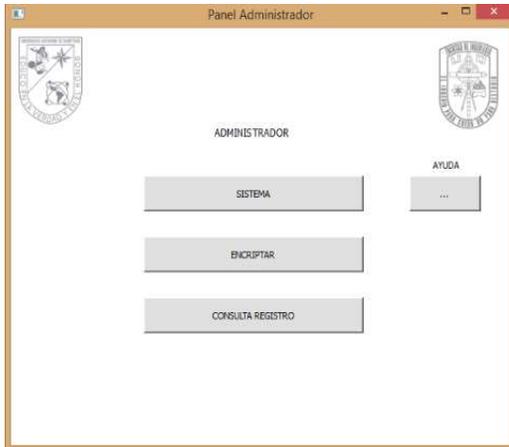
En la Figura 7 se muestra el diseño final del interfaz de usuario del sistema incorporando los algoritmos de cifrado, lectura de código QR, etc. El interfaz cuenta con una presentación sencilla pero funcional que facilita la interacción con el usuario, siendo un sistema abierto al cual se le pueden agregar más características o quitar según sean las necesidades del entorno donde se va instalar y la forma de gestionar el acceso. Se establecieron permisos de usuarios en el cual el administrador del sistema puede acceder a todas las características, como registrar usuarios nuevos, consultar registros o encriptar texto plano para pruebas o generar un nuevo acceso, los procesos del sistema se puede hacer de manera simultánea dado que la programación permite hacer varias tareas a la vez.



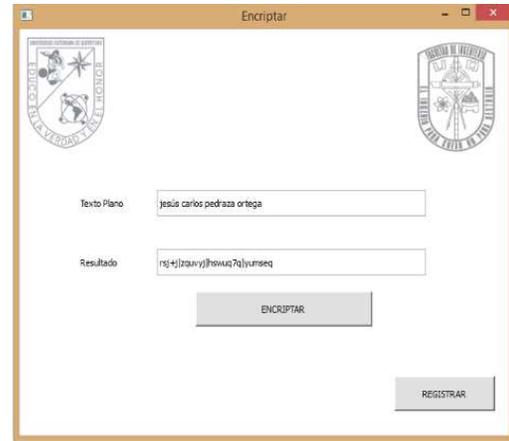
a) Pantalla de acceso



b) Campos solicitados para registro



c) Menú administrador



d) Pruebas interfaz gráfico y encriptación

**Figura 7. Interfaz Gráfico.**

En la Figura 8 en el inciso a se muestra las pruebas de la lectura del código QR, a una resolución de 400 por 304 pixeles, ideal para evitar problemas de lecturas, por otra parte, en el inciso b se muestra la lectura del código QR por un teléfono inteligente dando como resultado la cadena cifrada a diferencia del texto original mostrado en el inciso a, en este apartado se utilizó una codificación UTF-8, suprimiendo la letra ñ del código QR el cual generaba un error y no era posible su lectura. En el inciso c muestra una prueba de lectura del código correcta incorporando un pequeño circuito de pruebas, sin embargo, los primeros intentos la señal de activación no se alcanzaba apreciar, lo cual en el inciso d fue corregido por mandar la señal y hacer que tuviera una duración de 20 segundos tiempo suficiente para poder acceder a las instalaciones. Los diferentes leds indicadores en el inciso d indican las primeras pruebas con 5 usuarios diferentes, quedando de la siguiente manera:

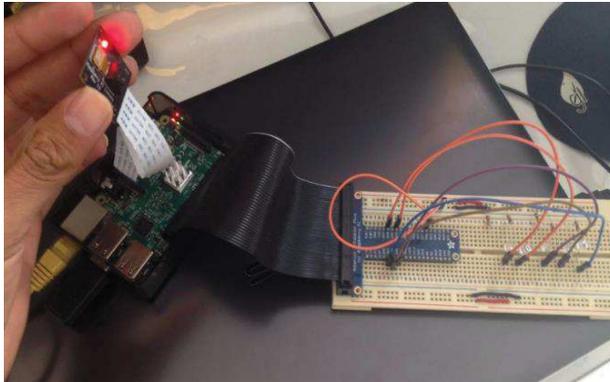
pins= { "Mayra Azucena Cintora García": 18, "Jesús Carlos Pedraza Ortega": 17, "Juan Manuel Ramos Arreguín": 27, "Jonathan Armando Troncoso Ramos": 22, "Juvenal Rodríguez Reséndiz" :23},  
 permitiendo obtener tiempos de respuestas, gestión de accesos y evaluar las capacidades de la lectura del código QR cifrado.



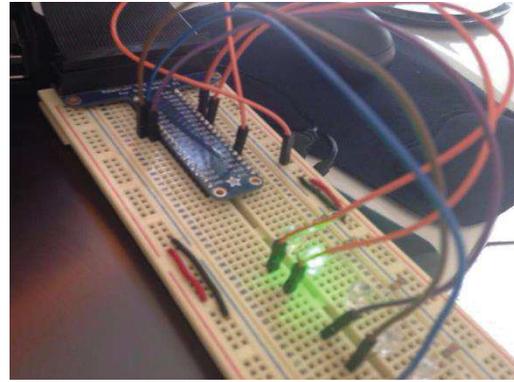
a) Lectura correcta del código



b) Datos cifrados del código QR



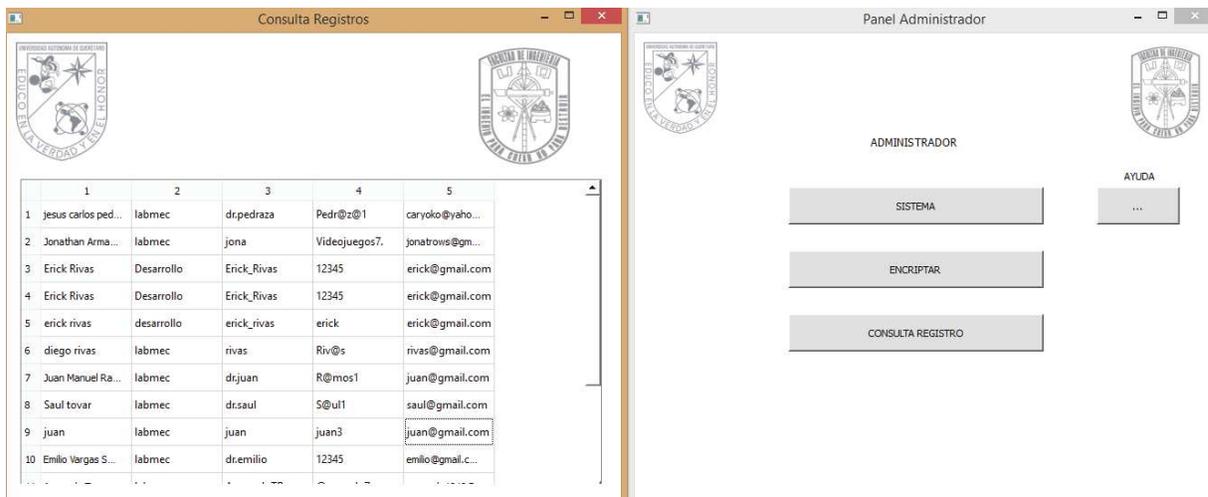
c) Captura del código cifrado QR



d) Señal de activación (acceso concedido)

**Figura 8. Pruebas.**

En la Figura 9 se muestra la implementación de la base de datos utilizando sqlite3, permitiendo mostrar los registros de la tabla de los usuarios registrados, iniciando con una muestra de 30 participantes almacenando nombre, departamento, usuario, contraseña y correo, la ventaja de utilizar sqlite3 radica en la gran compatibilidad con el interfaz gráfico desarrollado con QT en Python obtenido una buena respuesta entre las peticiones de las consultas de los registros a verificar por parte del administrador.



**Figura 9. Pruebas base de datos.**

## 6. Conclusiones

Se diseñó un prototipo de plataforma electrónica que contiene una cámara, un módulo de pines, que tiene el potencial de ser escalable en hardware y en programación, permitiendo abarcar más lugares en donde se requiera implementar seguridad y llevar una gestión centralizada del acceso, cabe mencionar que el sistema cuenta con un interfaz gráfico sencillo lo cual permite que sea más fácil la administración de la plataforma electrónica. Los sistemas de seguridad son costosos, y en muchos casos es difícil encontrar una opción que se adecue completamente a las necesidades, es por esto que se desarrolló una plataforma electrónica la cual servirá de base para implementar sistemas de seguridad robustos, utilizando solamente lo requerido y con la ventaja de ser escalable a un futuro.



El prototipo de plataforma electrónica queda abierto a posibles modificaciones de capacidad del sistema, con la finalidad de siempre mejorar su funcionamiento y rendimiento. Una de sus posibles aplicaciones puede ser en el hogar, escuelas o en entornos corporativos; lugares en los que son frecuentados por muchas personas día con día, la plataforma electrónica brinda una base sólida la cual puede ayudar de soporte a sistemas de seguridad complementarios o ser adaptado a las necesidades del entorno que se desee instalar.

## Referencias

- [1] Duc N. y Minh B. “*Your face is not your password face authentication by passing lenovo-asus-toshiba*”. Black Hat Briefings. Ha Noi University of Technology, Vietnam. (2009)
- [2] Bhattacharyya D., Ranjan R., Alisherov F. y Choi M. “*Biometric Authentication: A Review*”. In International Journal of u- and e- Service, Science and Technology, Vol. 2, No. 3, p. 13–28. (2009)
- [3] Murillo M., Cruz C., Abundiz F. y López R. “*Cifrado caótico de plantilla de huella dactilar en sistemas biométricos*”. Congreso Latinoamericano de Control Automático, pp. 18-23. (2014)
- [4] Arboledas D. “*Criptografía sin secretos con Python*”. Ra-Ma, Madrid, 1ra Edición. (2017)
- [5] Kumar S., y Kaur H. “*Face recognition techniques: Classification and comparisons*”. In International Journal of Information Technology and Knowledge Management, 5(2), p. 361–363. (2012)
- [6] Aceves M. y Ramos J. “*Fundamentos de Sistemas Embebidos –Mediante Lenguajes Descriptivos de Hardware*”. Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., México, 1ra Edición. (2012)
- [7] Zuriaga A. “*Estudio comparativo de las capacidades de Intel y ARM*”. Tesis de Maestría, Universidad Carlos III de Madrid, España. (2014)
- [8] Bay H., Ess A., Tuytelaars T. y Van Gool L. “*Speeded-up robust features (SURF)*”. In Computer vision and image understanding, 110(3), p. 346–359. (2008)
- [9] Junered M.” *Face Recognition in Mobile Devices*”. Master Thesis. Luleå University of Technology, Luleå, Suecia. (2010)
- [10] Chao W.” *Face Recognition*”. GICE, National Taiwan University, Taiwan. (2010)



# Sistema embebido de detección de obstáculos con freeRTOS para un robot móvil

Ocampo Álvarez Arturo<sup>1</sup>, Moreno Espinoza Oscar G. <sup>1</sup>, Fernández de Vega Francisco<sup>2</sup>, Olague Caballero Gustavo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM. Av. Rancho seco s/n, Impulsora. C.P. 57130, Nezahualcóyotl, Edo. Mex., México. [aoa@unam.mx](mailto:aoa@unam.mx), [gokaar@live.com.mx](mailto:gokaar@live.com.mx)

<sup>2</sup> Departamento de Tecnología de los Computadores y de las Comunicaciones. Universidad de Extremadura. Centro Universitario de Mérida. C/Sta. Teresa de Jornet 38. 06800, Mérida-Badajoz, España. [fcofdez@unex.es](mailto:fcofdez@unex.es)

<sup>3</sup> Departamento de Ciencias de la Computación, CICESE. Km. 107 carr. Tij.-Eda., 22860, Ensenada, México. [olague@cicese.mx](mailto:olague@cicese.mx)

## Resumen

*Este artículo trata del uso del sistema operativo en tiempo real, que se implementa en un microcontrolador de 8 bits en una plataforma de robot móvil. La principal tarea del sistema de control realizado es asegurar la comunicación con los diferentes tipos de sensores (ultrasónicos e infrarrojos) para la detección de obstáculos, usando la técnica marco de programación jerárquica, para lo cual se realizó una prueba que produce latencia y se comparó con la forma tradicional de programación de funciones. Los resultados obtenidos usando FreeRTOS son aceptables, logrando el control y activación de los actuadores a través de la comunicación con un sistema superior, integrando diversas tareas en un solo microcontrolador.*

**Palabras clave:** Microcontroladores; Sistema operativo en Tiempo Real; FreeRTOS; Sensores.

## 1. Introducción

Un sistema embebido es una combinación de hardware y software que utiliza microprocesadores o microcontroladores, este tipo de sistemas está diseñado para realizar una función específica o varias al mismo tiempo, dentro de un sistema más grande [1]. Máquinas industriales, automóviles, equipos médicos, cámaras, electrodomésticos, aviones, máquinas expendedoras y juguetes, así como teléfonos móviles son algunos de los dispositivos posibles para un sistema embebido. Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones requieren un sistema operativo o un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE, por sus siglas en inglés Integred Development Enviroment) para ser programadas, particularmente donde los entornos operativos en tiempo real deben ser atendidos, los diseñadores han detectado que los sistemas actuales son los suficientemente rápidos y las tareas son tolerantes de ligeras variaciones en el tiempo de reacción, por lo que los enfoques "casi en tiempo real" son adecuados. En estos casos, las versiones simplificadas del sistema operativo Linux se implementan comúnmente [2] en procesadores de bajo costo, aunque también hay otros sistemas operativos que han sido reducidos para funcionar en sistemas embebidos, incluyendo Embedded Java y Windows IoT (antes Windows Embedded).

Un sistema operativo en tiempo real (RTOS por sus siglas en inglés real-time operating system) es un sistema operativo que está optimizado para su uso en aplicaciones incrustadas o embebidas en tiempo real. Su principal objetivo es asegurar una respuesta oportuna y determinista a los eventos. Un evento puede ser una interrupción externa, como un interruptor de límite que se está golpeando, o interno como un carácter que se está recibiendo por transmisión serial. No es necesario utilizar un RTOS para escribir un buen software embebido. Sin embargo, en algún momento, a medida que



nuestra aplicación crece en tamaño o complejidad, los servicios de un RTOS podrían ser benéficos como es el caso que se expone en este trabajo.

El objetivo general de este trabajo es diseñar un robot móvil autónomo y en particular se muestran la implementación de un RTOS en un microcontrolador de 8 bits, para la detección de obstáculos. Se realizaron pruebas para medir el rendimiento del microcontrolador, elaborando tres rutinas que involucran interrupciones por timer y un proceso de cálculo, con el fin de generar latencia, siendo probadas de manera tradicional y con RTOS. Obteniendo buenos resultados se diseñó con RTOS una segunda prueba para implementar un sistema de percepción, usando sensores ultrasónicos e infrarrojos para realizar una navegación autónoma en un robot móvil con chasis tipo buggy escala 1:8.

## 2. Sistema de detección de obstáculos

Una tarea particular, como el control de un robot móvil, se puede separar en una serie de tareas más simples. Las tareas pueden incluir: la percepción del medio ambiente utilizando una cámara o escáner láser, la elaboración de mapas, planificar una ruta, monitorear el nivel de batería del robot y controlar los motores que impulsan las ruedas del robot. Cada una de estas acciones puede ser un código para realizar las tareas específicas. Se puede ejecutar código independientemente para realizar una tarea, pero también existe la posibilidad de comunicarse con otras tareas enviando o recibiendo mensajes. Los mensajes pueden consistir en datos o comandos u otra información necesaria para la aplicación. El sistema de detección propuesto utiliza **FreeRTOS** que es un popular núcleo del sistema operativo en tiempo real [3], para dispositivos embebidos que han sido portados a varios microcontroladores y se distribuye bajo la licencia GPL. Una de las características más importantes de un robot móvil es la navegación. Una navegación ideal significa que un robot puede planificar su trayectoria desde su posición actual hasta el destino y puede moverse sin ningún obstáculo. Estamos usando sensores ultrasónicos en este robot para encontrar la distancia a un objeto, y para obtener los datos de odometría del robot; también usamos sensores de proximidad IR (rayos infrarrojos) para detectar los obstáculos y evitar colisiones.

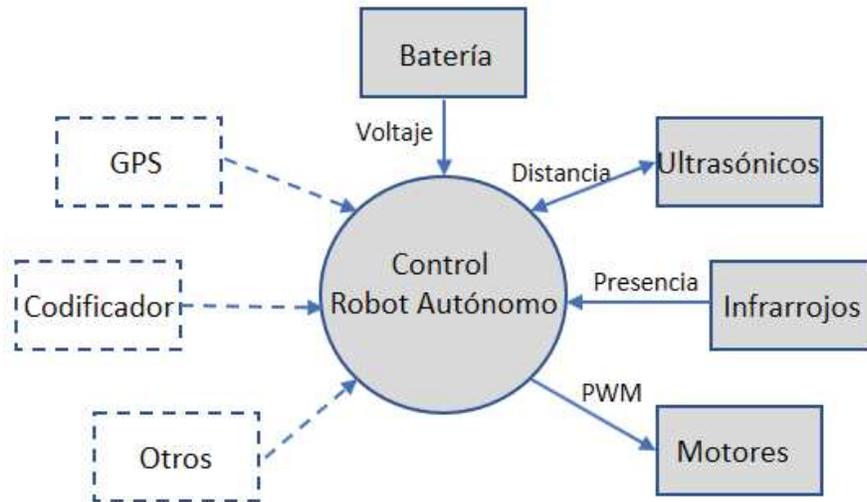


Figura 1. Diagrama de flujo de datos del sistema de control.

El primer paso del desarrollo de firmware es el diseño de la interacción entre componentes, que se puede observar en el diagrama de contexto de la figura 1, usando este diagrama se pueden observar las conexiones entre el programa de control y los otros componentes, así como la dirección del flujo de datos, los componentes en líneas punteadas serán considerados a futuro en el avance de este trabajo. Como se puede ver, la aplicación tiene que procesar el trabajo de muchos sensores,



algunos necesitan comunicación bidireccional para hacer la inicialización, medición y lectura de datos; y en otros, sólo se trata de leer los valores. La siguiente tarea del control es activar los actuadores y la comunicación con un sistema superior en caso de ser requerida. Para este primer acercamiento al objetivo general, se considera que el microcontrolador con FreeRTOS será el cliente, lo que significa que el sistema superior, es decir, el servidor tendrá la necesidad de enviar datos específicos o de configurar los actuadores y lanzar la aplicación en el microcontrolador, en otras palabras, el servidor deberá procesar los datos y enviar la respuesta si es necesario.

El siguiente diagrama, es considerado como el primer nivel de flujo de datos en la aplicación de control, y proporciona una mirada más cercana al objetivo específico de este trabajo (ver Figura. 2). Describe la división básica en las tres partes (procesos: Sensores, Actuadores y Comunicación con el servidor) y sus conexiones. Estos procesos estarán trabajando independientemente durante la mayor parte del tiempo. Por lo tanto, tiene que haber cuellos de botella entre ellos. Sin embargo, en este trabajo realizamos una prueba para determinar la eficiencia del micro de 8 bits propuesto usando la técnica llamada marco de programación jerárquica. La información de los sensores se guardó en un registro de memoria (Registro para sensores), que será compartida, y el proceso de comunicación con el servidor podrá leer estos datos. De igual forma se guardó en un registro de memoria para los codificadores y actuadores, logrando de esta forma triangular la información para un control más eficaz.

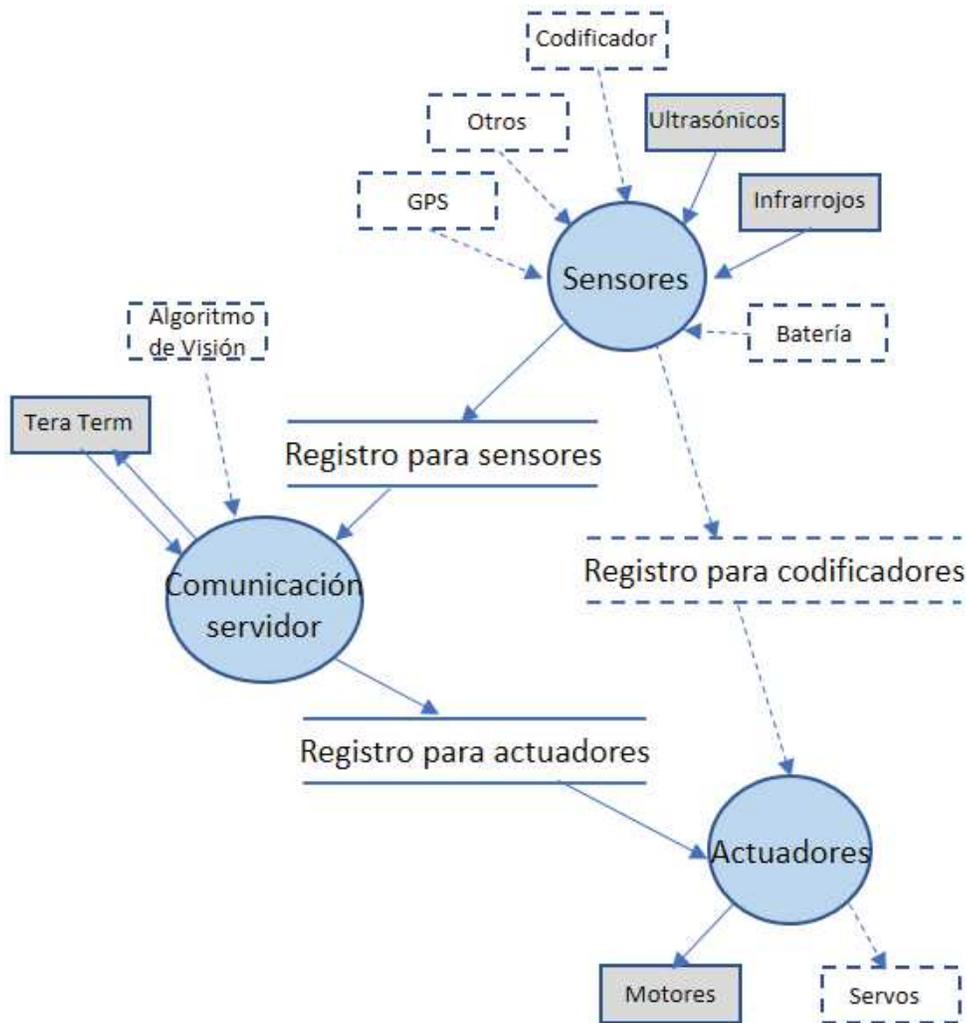


Figura 2. Diagrama de flujo del sistema de control.



## 2.1 Sensores

Los sensores ultrasónicos de distancia funcionan de la siguiente manera. El transmisor enviará un sonido ultrasónico que no es audible para los oídos humanos. Después de enviar una onda ultrasónica, se esperará un eco de la onda transmitida. Si no hay eco, significa no hay obstáculos delante del robot. Si el sensor receptor recibe un eco, se generará un pulso en el receptor, y se puede calcular el tiempo total de la onda, que se llevará al viajar del objeto y volver a los sensores del receptor. Si obtenemos este tiempo, podemos calcular la distancia al obstáculo usando la siguiente fórmula:

$$Vel.delSonido * TiempoPasado / 2 = DistObjeto \quad (1)$$

Aquí, la velocidad del sonido se puede tomar como 340 m/s. La mayoría de los sensores ultrasónicos tienen un rango de distancia de 2 cm a 400 cm. En este robot, utilizamos un módulo sensor llamado HC-SR04. La tensión de trabajo y la entrada/salida de este sensor ultrasónico es de 5V. El diagrama de tiempo de la forma de onda en cada pin se muestra en el diagrama de la figura 3.

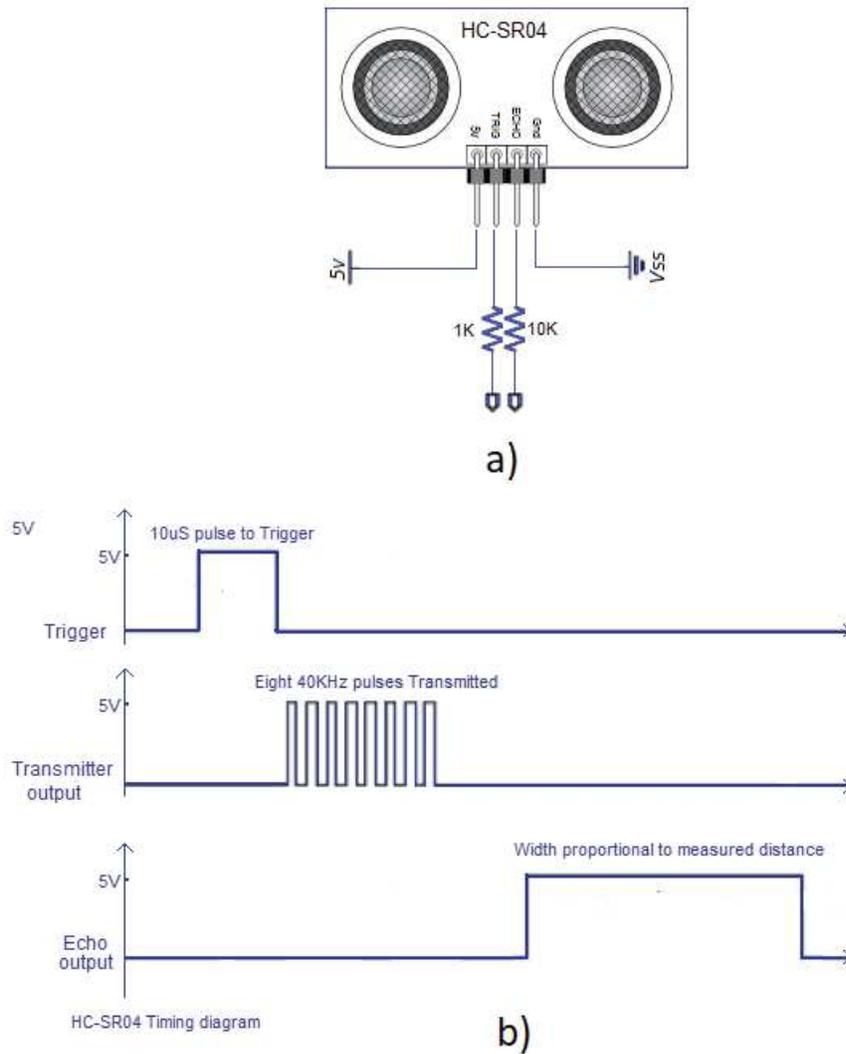


Figura 3. a) Configuración de pines para el HC-SR04. b) Diagrama de tiempos y forma de onda.

Necesitamos aplicar un pulso corto de  $10\mu s$  a la entrada del gatillo (Trigger) para iniciar el rango y luego el módulo enviará una ráfaga de ocho ciclos de ultrasonido a 40 KHz y elevará su eco. El eco (Echo) determina la distancia, que es el ancho de pulso y el rango en proporción. Se calcular el rango a través del intervalo de tiempo entre enviar señales de disparo y recibir señales de eco utilizando la siguiente fórmula:

$$Rango = \text{TiempoNivelAlto}_{pinEcho} * velocidad(340 M / S) / 2 \quad (2)$$

Se recomienda utilizar un retardo de 60 ms antes de cada disparo, para evitar la superposición entre el gatillo y el eco.

Los sensores infrarrojos son otro método para encontrar obstáculos, el principio de los sensores infrarrojos de distancia se basa en la luz infrarroja que se refleja desde una superficie al golpear un obstáculo. Un receptor IR capturaré la luz reflejada y el voltaje se mide en base a la cantidad de luz recibida. El sensor envía un haz de luz IR y utiliza la triangulación para medir la distancia. El rango de detección del sensor GP2Y0A41SK0F utilizado para el diseño del robot es entre 4 a 30 cm. La transmisión y la reflexión de la luz IR se ilustra en la figura 4.

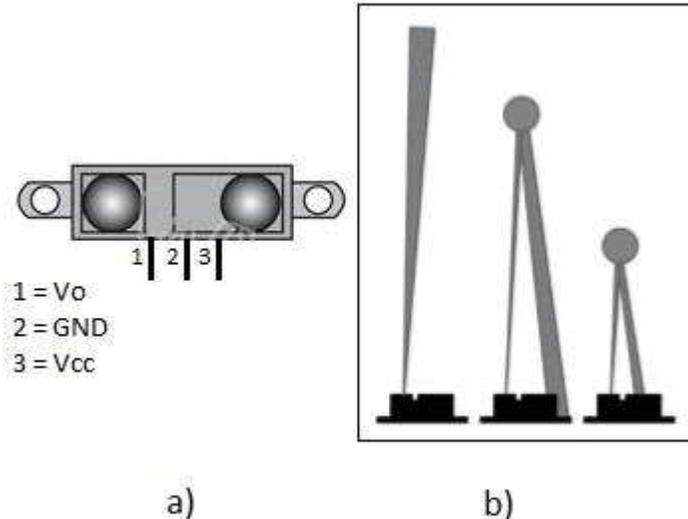


Figura 4. a) Sensor infrarrojo GP2Y0A41SK0F. b) Transmisión y reflexión del haz de luz.

## 2.2 Programación

El sistema operativo en tiempo real FreeRTOS está diseñado para ser pequeño y simple y cada vez es más popular debido a que los proveedores de ambientes de desarrollo IDE con eclipse, agregan soporte de depuración dedicado para este sistema operativo. En este trabajo se utilizó CodeWarrior para MCU 10.7 en su versión espacial [4], de la compañía NXP (de Next eXPerience). Esta compañía fabrica semiconductores y fue creada en el 2006 a partir de la división de la empresa holandesa Phillips, pero actualmente hay una propuesta de compra de parte de la compañía Qualcomm's. Sin embargo, este sistema operativo puede ejecutarse en microcontroladores de varios fabricantes como: Altera, Atmel, NEC, Xilinx, Intel, entre otros.

Como ya se mencionó al principio de esta sección una de las principales razones por lo cual se desarrolló este trabajo es separar una serie de aplicaciones, relativamente simples de percepción a través de sensores ultrasónicos e infrarrojos, en un solo procesador. Esta técnica llamada marco de



programación jerárquica (HSF por sus siglas en inglés Hierarchical Scheduling Framework) es una forma de integrar complejas aplicaciones en un solo procesador (ver figura 5).



Figura 5. Diagrama básico de división de tareas usando el marco de programación jerárquica.

La CPU es partida en varios subsistemas, cada subsistema contiene un conjunto de tareas que típicamente implementarían una aplicación o un conjunto de componentes. Cada tarea se asigna a un subsistema que contiene un planificador local para programar las tareas internas del subsistema. Cada subsistema puede utilizar una programación diferente y supervisada por una aplicación global. Para probar esta técnica y ver la eficiencia en nuestro microcontrolador de 8 bits, se programó un sistema modelo [5], el cual tiene 3 tareas: LED 1 que se enciende y se apaga cada 100 ms, LED 2 que se enciende y apaga cada 500 ms y FIBONACCI que crea la serie Fibonacci. Para realizar esta prueba se agregaron a CodeWarrior los componentes: FreeRTOS.PEupd, LED.PEupd y Utility.PEupd descargados de [6]. Para quienes no están familiarizados con CodeWarrior y Eclipse se puede consultar el Blog de E. Styger [7], que contiene mucha información de cómo implementar FreeRTOS en varias tarjetas de desarrollo.

La prueba para ver el desempeño del microcontrolador MC9S08JM60 de 8 bits, consistió básicamente en agregar los tres componentes que se muestran en la figura 6a, de tal manera que la **tarea 1** tiene como objetivo cambiar el estado del LED 1 cada 100 ms y la **tarea 2** cambiar el estado del LED 2 cada 500 ms (ver figura 6b). La cuestión interesante que evaluar con estas aplicaciones es que cada que se cumple el tiempo indicado para cada tarea, se envía una cadena de caracteres a través del puerto serial hacia una terminal del servidor, que para esta prueba consistió en una PC. Lo cual origina una latencia en el proceso. Y más aún la **tarea 3** genera la serie de Fibonacci, originando un gasto de recursos bastante fuerte para el microcontrolador (ver figura 7a).

Se programó un código similar, usando la forma secuencial de programación en lenguaje C, con funciones e interrupciones. Tomando en ambos casos como frecuencia 60 Hz, la base de tiempo fue  $t=1/f=16.66\text{ ms}$ , de tal manera que cada vez que el **Timer** del microcontrolador llegaba al tiempo indicado se genera una interrupción por software (ver figura 7b). Esto nos permitió controlar la prueba y establecer un límite de 3 segundos como máximo, y contar del lado del servidor el número de veces que se ejecutó él envió de datos.

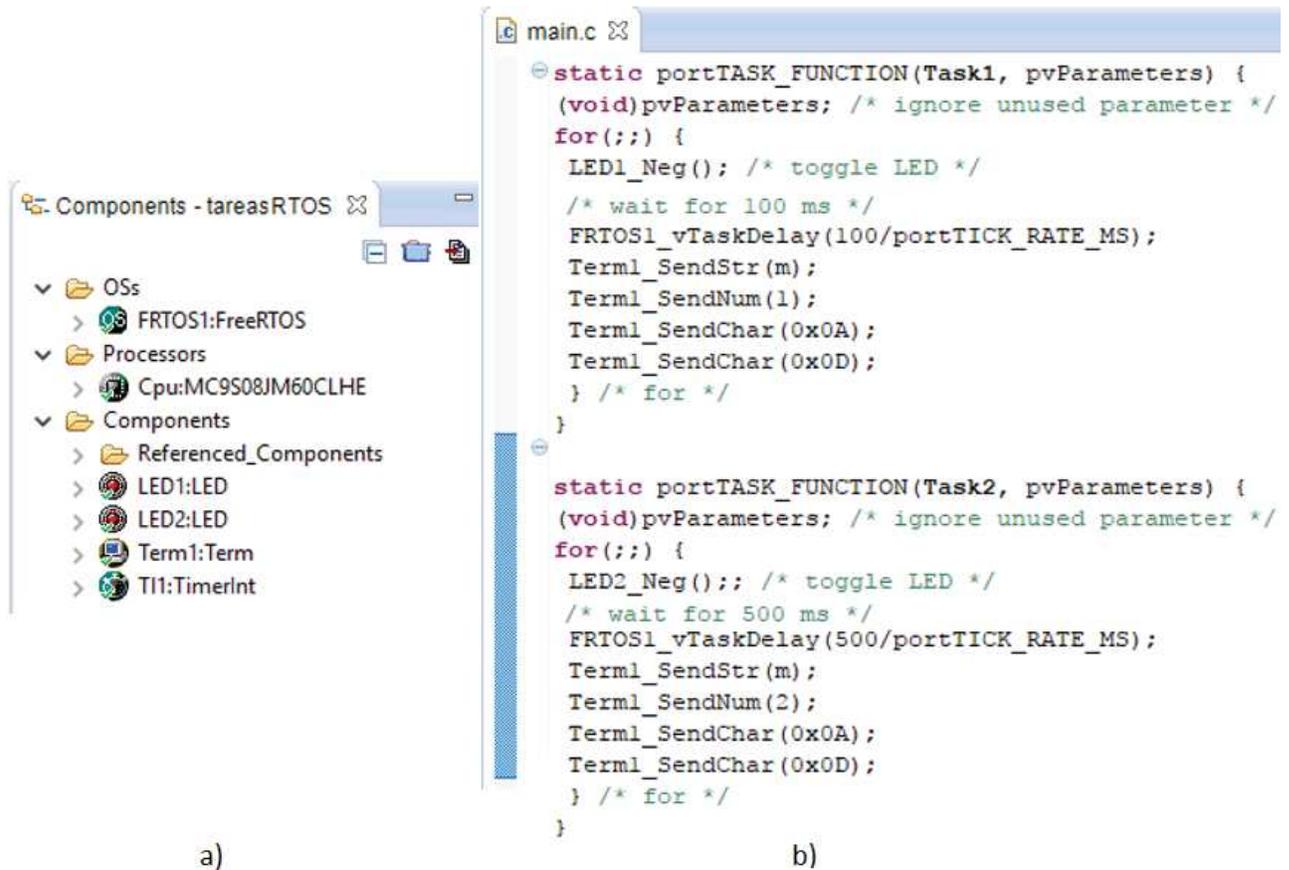


Figura 6. a) Componentes programados con CodeWarrior. b) Código con latencia para medir el rendimiento del microcontrolador MC9S08JM.

### 3. Resultados

El sistema de detección de obstáculos es solo una parte del robot. La estructura de conexión entre capas se modificó para propósitos de prueba: el sistema superior fue reemplazado por un PC con **Tera Term** Pro versión 2.3, en Windows 10. Configurando un puerto virtual a 9600 baudios, 8 bits de datos, paridad non y un bit de paro.

Los sensores ultrasónicos e infrarrojos fueron montados en un chasis tipo buggy escala 1:8 (ver figura 8). El movimiento de avance y retroceso es proporcionado por dos motores DC conectados al circuito LB293 se utilizan dos baterías de 7.2V 3000 mAh NiMH y un regulador de voltaje LM7805. La dirección es manejada por un motor DC con un arreglo de engranes y se basa en la geometría de Ackerman. Los sensores utilizados ya fueron descritos en la sección 2.1 y el microcontrolador MC9S08JM60 de 8 bits fue seleccionado prácticamente por su portabilidad con la familia ColdFire MCF51JM128 de 32 bits para futuras ampliaciones [8].

#### 3.1 Primera prueba.

Con el fin de comprobar si el microcontrolador seleccionado es capaz de soportar el sistema operativo FreeRTOS, se ejecutaron las tres tareas descritas en la sección anterior, para producir latencia a través de retardos, con la generación de la serie fibonacci hasta el número 46368. Y la transmisión de una cadena de caracteres cada 100 y 500 ms, durante 3 segundos, como se muestra en la figura 9.



```
static portTASK_FUNCTION(Task3, pvParameters) {
    (void)pvParameters; /* ignore unused parameter */

    for(;;) {
        if (n <= 46368)
        {
            if (f0 == 0){
                Terml_SendNum(0);
                Terml_SendChar(0x0A);
                Terml_SendChar(0x0D);
            }
            Terml_SendNum(n);
            n=f0+f1;
            f0=f1;
            f1=n;
            Terml_SendChar(0x0A);
            Terml_SendChar(0x0D);
        }
        else
        {
            n=1;
            f0=0;
            f1=1;
        }
    }
}

void main(void)
{
    /* Write your local variable definition here */

    /*** Processor Expert internal initialization. DON'T REMOVE THIS CODE!!! ***/
    PE_low_level_init();
    /*** End of Processor Expert internal initialization. ***/

    /* Write your code here */
    (void)FRTOS1_xTaskCreate(Task1, (signed portCHAR *)"Task1",
        configMINIMAL_STACK_SIZE, NULL, tskIDLE_PRIORITY, NULL);
    (void)FRTOS1_xTaskCreate(Task2, (signed portCHAR *)"Task2",
        configMINIMAL_STACK_SIZE, NULL, tskIDLE_PRIORITY, NULL);
    (void)FRTOS1_xTaskCreate(Task3, (signed portCHAR *)"Task3",
        configMINIMAL_STACK_SIZE, NULL, tskIDLE_PRIORITY, NULL);
}

uint8_t n_base_t = 0;
void TI1_OnInterrupt(void)
{
    /* Write your code here ... */
    if(n_base_t>60)
    {
        Terml_SendChar(0x0A);
        Terml_SendChar(0x0D);
        n_base_t = 0;
        Terml_SendNum(1);
        Terml_SendChar('S');
        Terml_SendChar(0x0A);
        Terml_SendChar(0x0D);
    }
    n_base_t++;
}
```

Figura 7. a) Código para generar consumo de recursos en el microcontrolador. b) Rutina de interrupción para monitorear el envío de datos. c) Definición de tareas en el programa principal.



Figura 8. Implementación de 3 sensores ultrasónicos y 2 infrarrojos en el Robot Móvil.

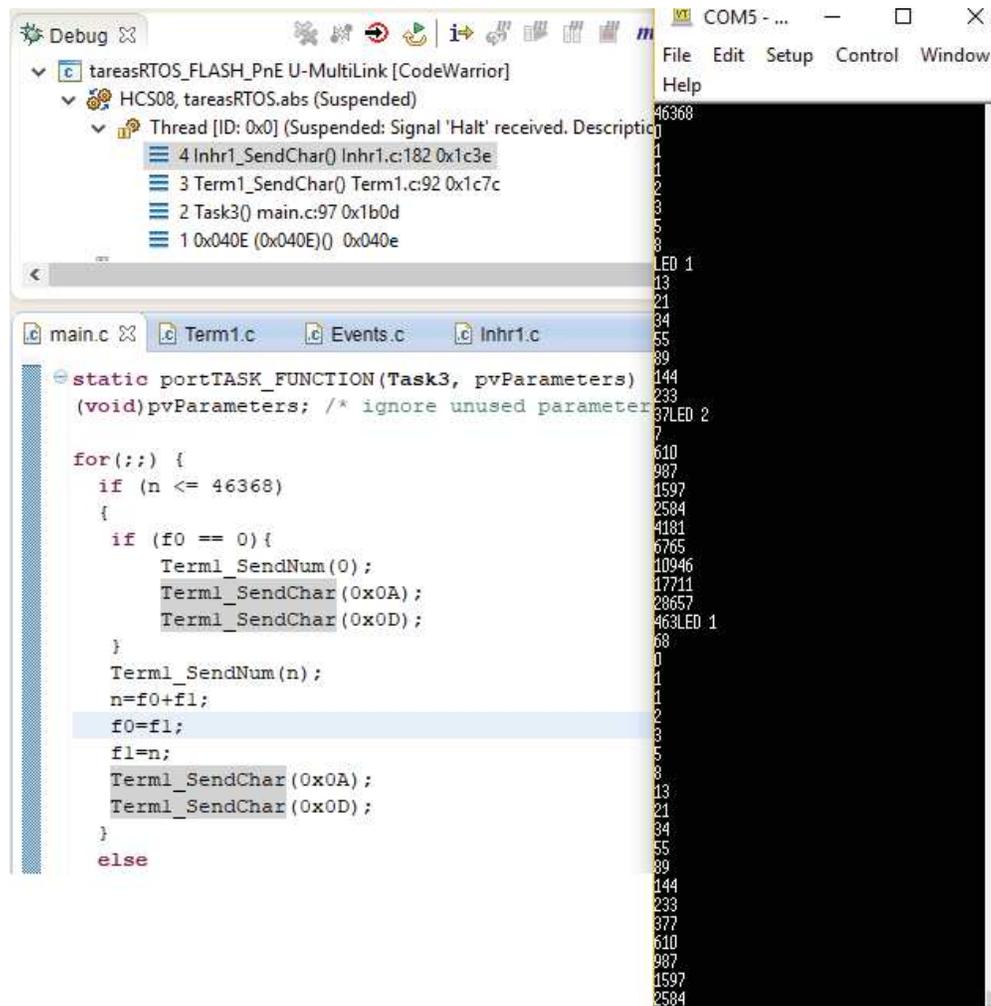


Figura 9. Resultados de la primera prueba ejecutando tres tareas al mismo tiempo.



**Tabla 1. Prueba de latencia sin FreeRTOS.**

MC9S08JM60 (Sin FreeRTOS)	LED 1	LED 2	# Fibonacci
1er segundo	10	2	160
2º segundo	1	0	176
3er segundo	0	0	168

Podemos observar en la tabla 1, que durante el primer segundo los resultados son como se esperaban, ya que las 10 veces que aparece la cadena de caracteres LED 1 concuerda con el tiempo de  $10 \times 100 \text{ ms} = 1 \text{ segundo}$ . De igual manera, la cadena de caracteres LED 2 concuerda con la duración de  $2 \times 500 \text{ ms} = 1 \text{ segundo}$ . Sin embargo, con forma aumenta el cálculo de la serie de Fibonacci la latencia se ve reflejada en los resultados de la tabla 1, desfasando el envío de las cadenas de caracteres.

**Tabla 2. Prueba de latencia con FreeRTOS.**

MC9S08JM60 (Con FreeRTOS)	LED 1	LED 2	# Fibonacci
1er segundo	10	2	194
2º segundo	10	3	187
3er segundo	10	3	187

Los resultados de la tabla 2, usando FreeRTOS en el microcontrolador son aceptables, observando que cumple prácticamente con el envío de las cadenas de caracteres en el tiempo asignado y calculando más números Fibonacci.

### 3.2 Segunda prueba.

Una vez realizada la prueba anterior se procedió a programar el sistema de detección de obstáculos como se muestra en la figura 10.

Recordando lo expuesto en la sección 2, la información de los sensores se guarda en uno o más registros de memoria, y para nuestro caso les llamamos: **REGSensores**, **REGReco** y **REGAuto**. que se encargan de almacenar en forma de bits, (0-sin obstáculo, 1-con obstáculo) la información de los sensores ultrasónicos: izquierda, derecha, central y reversa, así como infrarrojo y sus valores en x, y, z. como se muestra a continuación:

```
volatile static byte REGSensores=0x00; //SwW Sxx Syy SIF SUr SUi SUC SUD
```

REGReco se usa para ejecutar a la acción proveniente del servidor: Alto, Derecha, Izquierda, Reversa, Avanza y Autónomo (ver figura 9a).

```
volatile static byte REGReco=0x00; //www xxx yyy zzz CA1 CA0 MV1 MV0
```

De igual forma se asigna una codificación para el registro REGAuto, que se encarga de almacenar la información para accionar los actuadores (ver figura 9b).

```
volatile static byte REGAuto=0x00; //AUw AUx MD1 MD0 MA1 MA0 AC1 AC0
```



Almacenando la información anterior en los registros de 8 bits, el servidor y las demás tareas pueden consultar el estado de los procesos para seleccionar la acción adecuada. Teniendo la seguridad que el sistema operativo FreeRTOS siempre le asignará un tiempo de procesamiento a cada tarea. También hay que utilizar eficiente y responsablemente el tiempo del microcontrolador, porque obviamente hay tareas que no requieren mucho tiempo de proceso ni tanta prioridad para completarlas y la desventaja que podemos observar con esta técnica es que una mala programación puede producir estragos en el funcionamiento del sistema.

```
*ProcessorExpert.c
PTAD = 0x00;
PTADD = 0xFF; //Dir. PTA -> Output
PTGD = 0x00;
PTGDD = 0x00; //Dir. PTG <- Input
for(;;){
    if(!INPUT_1()) {
        //checa Dato del Servidor
        //bit 0 a 0 --> Stop
        REGReco &= ~(1<<3);
    }
    else { //bit 3 a 1 --> Auto
        REGReco |= (1<<3);
    }
    switch(REGReco & 0x0F){
        case 0 :
            accionAlto();
            tareas();
            break;
        case 1 :
        case 5 :
            accion60Derecha();
            tareas();
            break;
        case 2 :
        case 6 :
            accion60Izquierda();
            tareas();
            break;
        case 3 :
        case 7 :
            accionReversa();
            tareas();
            break;
        case 4 :
            accionAvanza();
            tareas();
            break;
        case 8 :
            autonomo();
            break;
    }
}

void tareas(void) {
    byte Md, Ma, Accion;
    byte VelH, VelL;

    Accion=REGAuto & 0x03;
    Ma=(REGAuto >> 2) & 0x03;
    Md=(REGAuto >> 4) & 0x03;
    switch(Accion){
        case 0 : // 262ms, Duty al 80% --> 210ms (52500)
            VelH=0xCD;
            VelL=0x14;
            Avanza(Md, Ma, VelH, VelL);
            break;
        case 1 : // 262ms, Duty al 50% --> 130ms (32500)
            VelH=0x7E;
            VelL=0xF4;
            Reversa(Md, VelH, VelL);
            break;
        case 2 : // 262ms, Duty al 60% --> 156ms (39000)
            VelH=0x98;
            VelL=0x58;
            Avanza(Md, Ma, VelH, VelL);
            break;
        case 3 : // 262ms, Duty al 40% --> 104ms (26000)
            VelH=0x65;
            VelL=0x90;
            Avanza(Md, Ma, VelH, VelL);
            break;
    }
}

void Avanza(byte md, byte ma, byte velh, byte vell) {
    TPM2COVH=velh; //Velocidad
    TPM2COVL=vell;
    //Motor-Traccion (Adelante)
    PTAD_PTAD4=ma & 0x01;
    PTAD_PTAD5=(ma >> 1) & 0x01;
    //Motor Direccion (Izg.-Der.)
    LEDpin7_PutVal(md & 0x01);
    LEDpin8_PutVal((md >> 1) & 0x01);
}
```

Figura 10. a) Tarea que selecciona la acción proveniente del servidor. b) Tarea que controla la velocidad de los actuadores. c) Tarea que mueve los motores según los argumentos enviados, hacia adelante o hacia atrás y con la velocidad indicada.



## 4. Conclusiones

Consideramos que la principal aportación de este trabajo ha sido demostrar que el uso del sistema operativo en tiempo real FreeRTOS tiene ventajas, frente al diseño clásico de funciones y se ha conseguido realizar un diseño de un sistema embebido para la detección de obstáculos, usando la técnica HSF para integrar diversas tareas en un solo procesador. El trabajo por realizar a corto plazo consistirá en desarrollar las tareas: GPS, codificador y nivel de batería. Así mismo, también se probará un microcontrolador de 32 bits con arquitectura ARM, con la posibilidad de utilizar las bibliotecas de visión. También creemos que la unidad robótica descrita se puede utilizar tanto en interiores como en exteriores debido a su construcción mecánica y sensores. Este robot se piensa utilizar para operar en pequeños grupos, para adquirir y distribuir datos de su entorno de tal forma que se pueda construir una plataforma de robots de enjambre.

## 5. Agradecimientos

Este trabajo es apoyado por el proyecto PAPIME PE109416 de la DGAPA-UNAM, "Taller de robótica para inteligencia de enjambres con código abierto" a quien se extiende el presente agradecimiento.

## Referencias

- [1] Zhou Jianjun, zhou Jianhong, "Research on Embedded Digital Image Recognition System Based on ARM-DSP" 2009 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology.
- [2] "Move Innovation", [en línea]. [Fecha de consulta: 28 agosto 2017]. Disponible en: <https://www.yoctoproject.org/organization/move-innovation>
- [3] "What is An RTOS?", [en línea]. [Fecha de consulta: 06 septiembre 2017]. Disponible en: <http://www.freertos.org/about-RTOS.html>
- [4] "Special Edition Software" [en línea]. [Fecha de consulta: 07 septiembre 2017]. Disponible en: [https://www.nxp.com/products/developer-resources/software-development-tools/codewarrior-development-tools/downloads/special-edition-software:CW\\_SPECIAL EDITIONS](https://www.nxp.com/products/developer-resources/software-development-tools/codewarrior-development-tools/downloads/special-edition-software:CW_SPECIAL EDITIONS)
- [5] Rafia Inam, Jukka Maki-Turja, Mikael Sjodin, S. M. H. Ashjaei, Sara Afshar, "Support for Hierarchical Scheduling in FreeRTOS", *ETFA2011 Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2011 IEEE 16th Conference on.* :1-10 Sep, 2011
- [6] "FreeRTOS", [en línea]. [Fecha de consulta: 28 agosto 2017]. Disponible en: <http://www.steinerberg.com/EmbeddedComponents/FreeRTOS/>
- [7] "Tutorial: FreeRTOS on DEMOJM", [en línea]. [Fecha de consulta: 04 agosto 2017]. Disponible en: <https://mcuoneclipse.com/2012/06/28/tutorial-freertos-on-demojm/>
- [8] Arturo Ocampo; Oscar M. Espinoza, "Diseño de sistemas mecatrónicos escalables usando flexis de freescale", 1er Congreso Iberoamericano de Instrumentación y Ciencias Aplicadas. SOMI XXVIII. Sn Francisco Campeche, Campeche. México 2013.



# Sistema de autoalineación de un láser a fibra óptica de vidrio

Shomar Ríos Martín<sup>2</sup>, Talavera Velázquez Dimas<sup>1</sup>, Rivas Araiza Edgar Alejandro<sup>1</sup>, De la Peña Trejo Javier<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro, <sup>2</sup>Universidad Tecnológica de San Juan del Río.

## Resumen

*Debido a la dificultad de lograr y mantener estables tanto la autoalineación como el autoacoplamiento de señales láser (SL) a fibras ópticas de vidrio (FOV) en experimentos donde se requieren conducir estas señales, ya que los diámetros de las FOVs para telecomunicaciones son de entre 6  $\mu\text{m}$  a 8  $\mu\text{m}$  y el diámetro del haz láser es de 2 mm, por lo cual se requiere una interfaz que por una parte controle, y adquiera datos de un mecanismo que cuenta con la resolución requerida y por otra, que conecte a este equipo a una pc. En el presente trabajo se muestra el proceso de diseño y desarrollo de una tarjeta de control que conecte el mecanismo de autoalineación y autoacoplamiento del láser a una fibra óptica hacia una MyRIO. Se hizo una tarjeta electrónica de control para el mando de los actuadores, y al mismo tiempo tener un historial del comportamiento de los elementos utilizados, en especial la temperatura alrededor de todo el mecanismo.*

**Palabras clave:** Electrónica, adquisición de datos, autoacoplamiento óptico, LabVIEW, MyRIO, fibra óptica de vidrio.

## 1. Introducción

Al trabajar en el diseño y construcción de dos láseres de fibras ópticas de fluorozirconatos, (ZBLAN): dopadas con tulio y holmio, por *upconversion*, y utilizando un láser de bombeo por dos láseres Stokes obtenidos por efecto Raman al coexcitar el medio activo que fueron tanto una fibra de ZBLAN:tulio y ZBLAN:holmio, en el primer caso se obtuvo emisión láser a 481 nm, que es parte de la ventana del espectro visible en el azul, este láser puede ser utilizado en pantallas de alta definición, en transmisión bajo el agua, grabado de discos compactos de alta densidad, transmisiones aéreas, entre otras aplicaciones; en cuanto al láser emitido por la fibra óptica de holmio puede ser utilizado en aplicaciones médicas, como bisturí óptico, este láser emite a 2950 nm que está en el infrarrojo medio [1] [2].

Cabe mencionar que para poder hacer oscilar estos láseres fue necesario alinear el láser de bombeo a la cavidad láser compuestas de fibras ópticas láser dopadas con tulio y holmio, por lo que dentro de estas investigaciones al menos un 70 % de este tiempo se invirtió en acoplar el sistema mecánico, y una de las principales desventajas es que no se mantenía estable el acoplamiento, por lo que con el presente proyecto del autoalineador - autoacoplador se busca reducir los tiempos del autoacoplamiento y lograr la estabilidad en su transmisión de potencia a través del sistema láser de bombeo y el núcleo de la fibra óptica de vidrio.

A continuación se describe algunos trabajos similares de microposicionamiento que dan la visión e inspiración para obtener la resolución que se requiere según lo ya enunciado en los párrafos anteriores.

En el Centro de Metrología y Precisión en la Universidad de California del Norte en Estados Unidos han desarrollado un sistema de seis grados de libertad para una mesa de microposicionamiento. En específico se ha desarrollado un sistema de desplazamiento lineal con desplazamiento mínimo de 1.67 micrómetros con una carga axial de 27.4 N y una distorsión de 0.5 mm, Este al final de la investigación logro una eficiencia del 90% con una carga útil de 0.650 kg [3].

La revista NANOTECHNOLOGY se hace el análisis y diseño virtual de unos amplificadores de dos grados de libertad para el microprocesamiento de desplazamientos de alta resolución mediante un



mecanismo simétrico por medio de bisagras de flexión; en el mismo se describe el esquema óptimo y la demostración experimental, así como las propuestas de mejora ante los puntos de error [4].

En la universidad de Beijing en el 2015 han investigado sobre una etapa de microposicionamiento a control remoto; en el artículo que presentan se muestra el diseño y modelado de una plataforma de salida basada en flexión mediante rotación de muy alta precisión, esto lo lograron con elementos finitos y modelos establecidos en el prototipo presentado antes de fabricar la etapa de pruebas de alto rendimiento; los resultados que obtuvieron fue un desplazamiento lineal de 9.2 micrómetros validando así la eficiencia de su mecanismo [5].

En el 2004 en la universidad de Tokio investigaron sobre una mesa xyz impulsando cada eje por un par de motores DC con retroalimentación de micro posicionamiento, logrando así movimiento lineales de 20 nm con un error de 0.2 nm; todo esto basando se en su codificador de retroalimentación el cual funcionaba por medio de ondas senoidales, cabe resaltar que su desplazamiento máximo por eje era equivalente a un pulgada [6].

En el Ministerio de Educación de la Universidad de Tianjin en China en el año 2015 diseñaron un sistema de seis grados de libertad con un modelo cinemático mediante matrices de transformación aplicadas a bisagras de flexión y un control híbrido de retroalimentación capaz de trabajar hasta 570 Hz [7].

La aportación del presente trabajo es la creación de la etapa de potencia, que alimentará a los motores, la caracterización del láser de bombeo y el control y adquisición de datos con el software LabVIEW mediante la interfaz de una tarjeta MyRIO, lo anterior se ilustra en la Figura 1.

El trabajo se realizó para caracterizar la estabilidad en potencia de la emisión del diodo láser, el cual se utiliza como bombeo para el estudio de la alineación y acoplamiento en fibras ópticas de vidrio FOVs, tanto las utilizadas para telecomunicaciones, como especiales basadas en fluorozirconatos, utilizadas como medios activos para generar oscilaciones láseres (también llamados fibras láser). Este primer estudio se basa en analizar el comportamiento de este diodo en su voltaje de alimentación, su consumo de corriente, la temperatura del diodo láser y monitorear la potencia de la emisión láser a la salida de este diodo. Se requiere monitorear la temperatura en el sistema para determinar si el funcionamiento normal del sistema altera las propiedades y eficiencia de la alineación y el acoplamiento de la señal láser en FOV. En caso de que los resultados obtenidos nos indiquen que es un factor importante que altera la eficiencia de la emisión láser, se plantea desarrollar un enfriador con control simple de temperatura para mantener el sistema a una temperatura de operación. Para todo esto, es necesario crear la etapa de potencia para el control y monitoreo de las señales correspondientes al sistema de auto alineación, así como el control en LabVIEW para ejecutar la función del alineador mediante una tarjeta MyRIO.

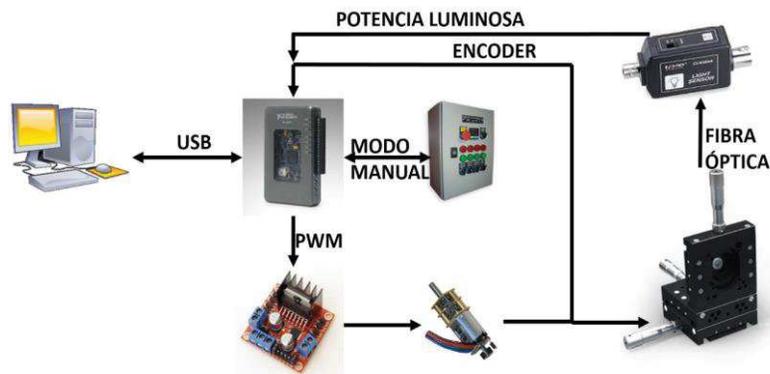


Figura 1. Diagrama a bloques general.

## 2. Marco teórico

### 2.1 La fibra óptica

Las FOVs son filamentos de vidrios y mejor llamadas guías de onda con diámetros de núcleo entre 3.6  $\mu\text{m}$  y 8  $\mu\text{m}$ , mientras los FOPs son filamentos de plástico, en los cuales al hacer incidir una señal electromagnética, que en ese caso es un láser verde, por sus dimensiones es difícil alcanzar su alineación y acoplamiento óptico. El acoplamiento de la SL a la FOV se lleva a cabo por reflexión total interna, la cual se va reflejando en miles o millones de veces en el interior del núcleo y se transmite hasta el extremo de la FOV [8] [9] [10] [11] [12].

### 2.2 Electrónica de potencia

La electrónica de potencia es aquella que se encarga de estudiar los dispositivos, circuitos, sistemas y procedimientos para el procesamiento, control y conversión de la energía eléctrica; esto se encuentran en todos los dispositivos electrónicos que buscan ir más allá del procesamiento y control de señales sino en aquellos que ya conllevan un control directo de actuadores y retroalimentaciones de transductores los cuales requieren un acondicionamiento en materia de energía “potencia “ para poder ser procesados y controlados adecuadamente. Se usan los siguientes componentes:

Los puentes H son circuitos que permiten a un motor de corriente directa girar en ambos sentidos, se les puede encontrar en una amplia gama en circuitos integrados; los puentes H más complejos incluyen puertos de habilitación y control de PWM, incluso existen algunos con solo tres entradas como dirección, freno y PWM tal como el de la Figura 2 que se empleó en este proyecto [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19].

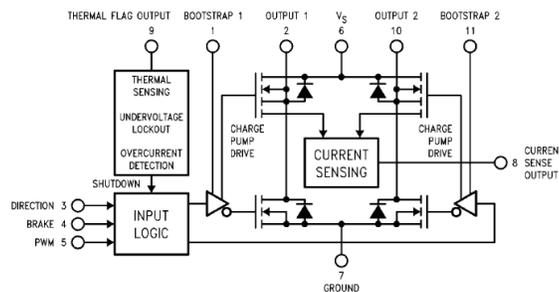


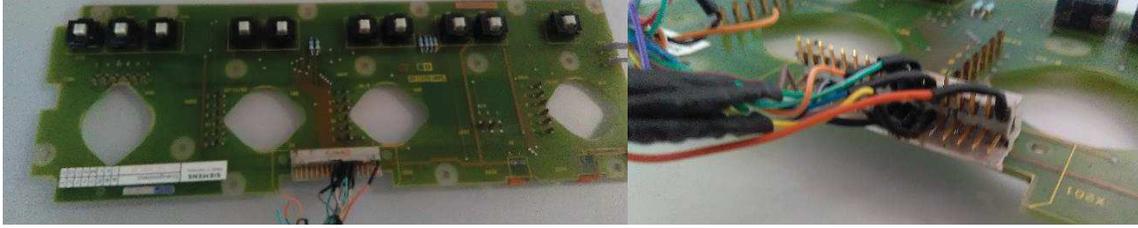
Figura 2. Diagrama funcional del puente H LM18200.

## 3. Desarrollo del trabajo

Se utilizaron diversos sistemas electrónicos para el desarrollo del trabajo, los cuales se presentan a continuación.

### 3.1 Tablero de control

Se usa un tablero de control de la marca alemana SIEMENS modelo SINUMERIK 6FC3788-3EF20 con un voltaje óptimo de operación de 24 V. El tablero de control se restaura y se obtienen las tablas de verdad para conocer su comportamiento y determinar los puertos y pines a usar. Se usa un cable plano de 34 pines para que sea similar al tablero nuevo. Lo anterior se ilustra en la Figura 3.



**Figura 3. Estado inicial del tablero de control.**

Después se analiza el mapeo de tablero según lo que se podía ver a contra luz en su placa de conexiones y la poca documentación encontrada y se mapean las terminales del cable plano con pruebas de continuidad con un multímetro. Los resultados muestran dos terminales comunes y las demás terminales son salidas de datos correspondientes a cada uno de los mandos del tablero. Los seleccionadores son digitales, compuestos de placas con circuitos circulares impresos y pequeños cepillos unidos mecánicamente a las perillas y según la posición de las perillas se da una combinación de binarios para saber el valor en el que se posiciona el indicador de las perillas.

Debido a que el tablero de control es para una máquina CNC tal como se ve en la Figura 4, algunos seleccionadores se descartan y se emplean solo los actuadores afines al propósito del proyecto; siendo así que se controla con este tablero la velocidad (PWM), el eje a mover, la potencia del láser, la dirección de los motores y uno de los dos paros de emergencia disponibles en el mecanismo.



**Figura 4. Imagen superior del tablero.**

### **3.2 Sensores de temperatura**

Debido a que se usa el controlador MyRIO, para aprovechar la resolución del ADC, se amplifica la señal, haciendo uso del amplificador operacional LM358 el cual tiene alimentación unipolar. Se emplea un arreglo de amplificador no inversor con una resistencia de 1.5 K $\Omega$  a la entrada y una resistencia de 4.7 K $\Omega$  de retroalimentación; adicional al circuito se incluye una resistencia de 560  $\Omega$  y un diodo zener a 5.1 V modelo 1N4733A, como protección a los puertos de la MyRIO, como se ve en la Figura 5. Este arreglo se emplea en todos los sensores de temperatura, los cuales son siete alrededor, del mecanismo. Se usa un sensor en cada motor, uno en el láser de bombeo y dos sensores libres para monitorear puntos diversos del sistema.

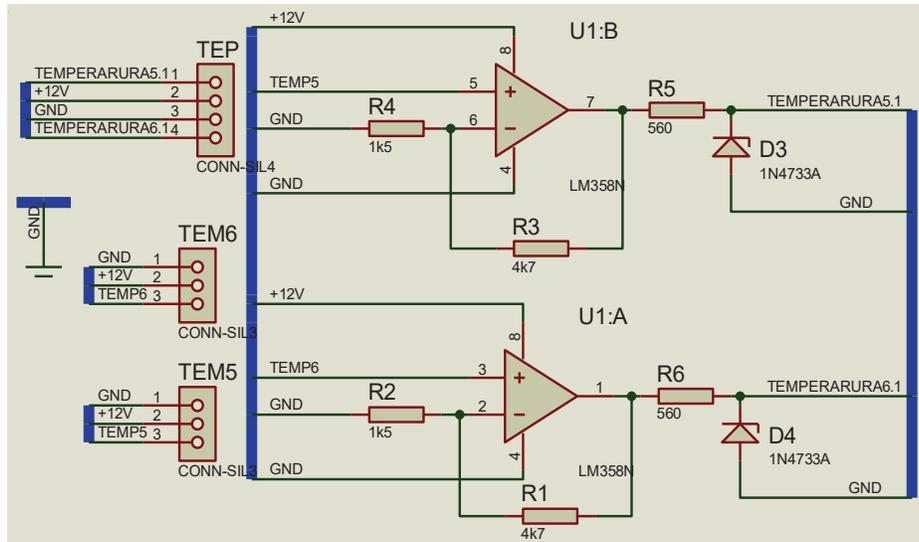


Figura 5. Diseño esquemático para dos sensores de temperatura.

En la Figura 6 se muestra el circuito armado donde resaltan las terminales superiores que son para conectar cable del LM35 y los pines inferiores al igual que en todas las tarjetas se utilizan para unir este circuito a la placa general encargada de hacer la distribución de datos adquiridos y emitidos a la MyRIO.

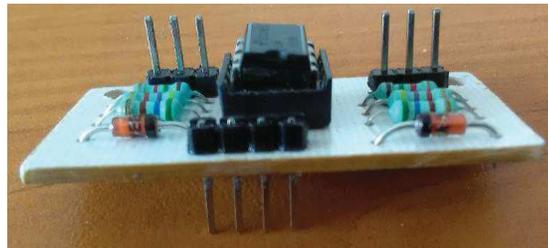


Figura 6. Vista lateral del circuito armado.

Atendiendo a las recomendaciones de la hoja de datos del LM35, en el cableado se agrega una resistencia de 68  $\Omega$  y un capacitor electrolítico de 1 microfaradio en serie uniendo el pin de salida de voltaje con el pin de tierra para tener una alta impedancia. Para el cableado se emplea cable de circuito cerrado de televisión y en la terminal de conexión se colocan pines hembra y una marca de alambre en el lateral de conexión de tierra importante para saber la posición correcta de conexión con referencia a su PCB.

### 3.3 Láser de bombeo

Contamos con un láser de bombeo BGL001 de la marca BOB LASER, el cual es un láser de emisión verde. Para su control se acopla un sensor de temperatura, se coloca un regulador de voltaje LM317 para controlar su voltaje de suministro, y un transistor TIP31 para el encendido y apagado del mismo mediante un interruptor en el tablero pero que no va en conexión directa sino que es por procesamiento en la MyRIO que nos permite que en situación de paro este mismo se apague sin importar la instrucción del tablero. Las Figuras 7 y 8 muestran el circuito esquemático y la tarjeta de circuito impreso, respectivamente.

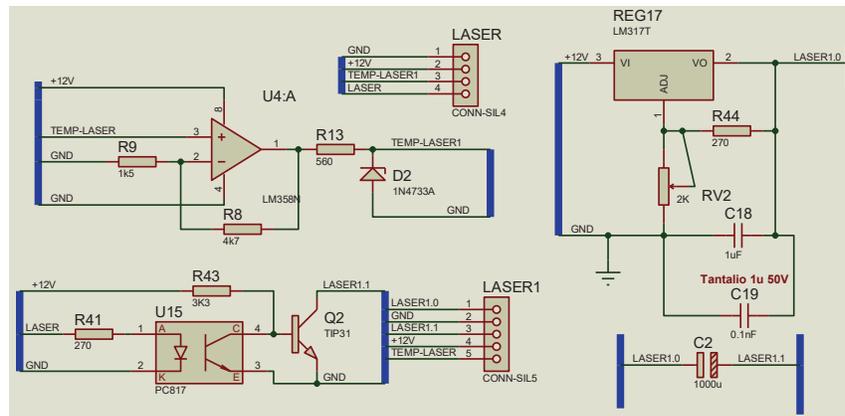


Figura 7. Diseño esquemático para control de laser de bombeo.

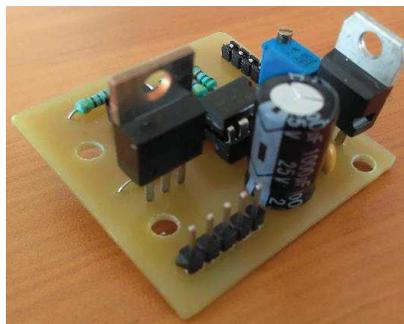


Figura 8. Vista lateral del circuito armado.

Al igual que en las otras tarjetas diseñadas, los pines superiores son para la conexión del dispositivo y los inferiores para la conexión del circuito a la tarjeta general que hace de interfaz a la MyRIO.

### 3.4 Control de motores

Se usan motores de la Marca POLOLU con caja reductora de 131.25:1 modelo 37Dx57L con encoder de 64 cuentas por revolución y sin cubierta final. Sus características eléctricas son 12 V de alimentación, con capacidad de carga de 18 kg y un consumo de corriente de 5 A. Se usa un puente H con encapsulado TO-200 con el código LMD18200, el cual cuenta con una entrada de dirección, freno y PWM, entre otras. Con este puente H se logra disminuir las señales de control. Con el debido optoacoplamiento y distribución de datos logramos crear módulos individuales para el control de cada motor. Las Figuras 9 y 10 muestran el diagrama esquemático y el circuito impreso diseñados para el control de los motores.

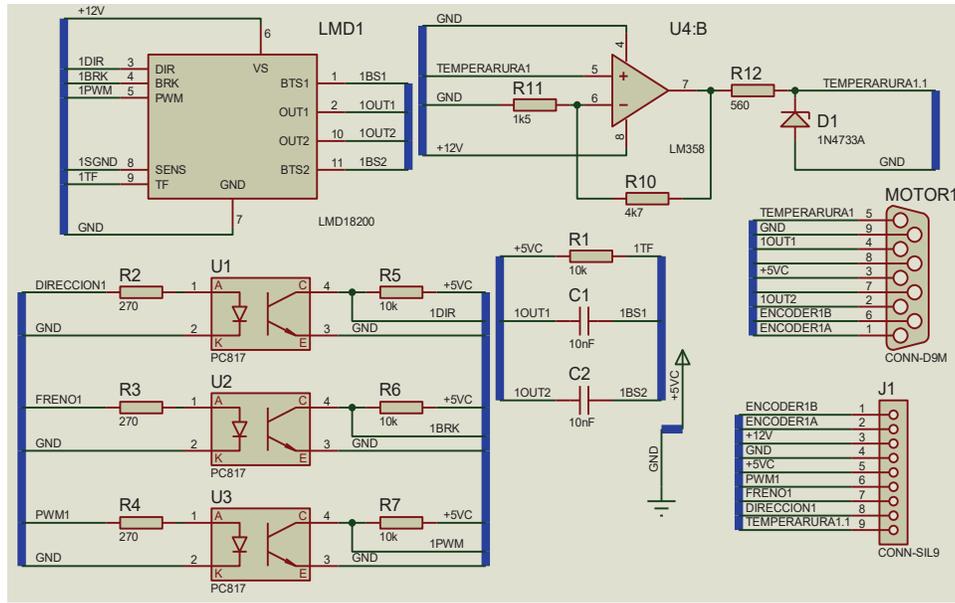


Figura 9. Diseño esquemático para control de motor.

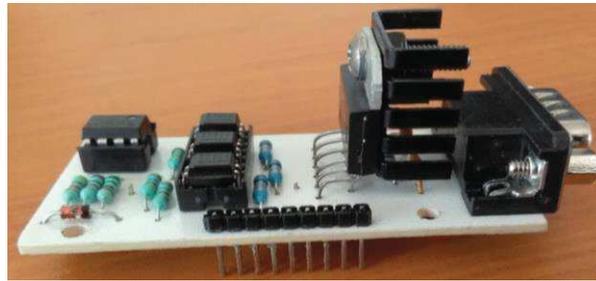


Figura 10. Vista lateral del circuito armado.

Enseguida, se crean los buses de los sensores de temperatura y el cable de control del motor hacia la terminal DB9 que es la que se propuso para unir los motores a su tarjeta de control con un cable de 8 hilos marca STEREN modelo M-08X22MMD-305.

El empleo de estas tarjetas es muy útil y práctico tanto en el empleo como el armado debido a que ante la falla de un componente se hace un diagnóstico rápido y análisis del problema gracias al diseño modular y las bases empleadas para la colocación de los componentes; puesto que se emplea el conector DB9 se puede inducir señales de prueba y así hacer un test específico de entradas y salidas ya sea que se cuenta o no con el bus de datos del motor.

### 3.5 Sensor óptico

Para tener la retroalimentación de la cantidad de la potencia emitida por el diodo láser, se usa el sensor OPT301 el cual es un integrado de fotodiodo con amplificador de señal, con un comportamiento de foto resistencia, pero con salida de voltaje. Este transductor requiere de alimentación bipolar, suministrada con un MAX232, para obtener una alimentación de +9 V y -9 V. Al momento, solo se han hecho pruebas en tarjeta de experimentación del comportamiento del sensor y se ha validado su funcionamiento en referencia a su hoja de datos. Se diseña el siguiente circuito y se crea la placa PCB para el montaje del sensor y en el mecanismo. Lo anterior se ilustra en las Figuras 11 y 12.

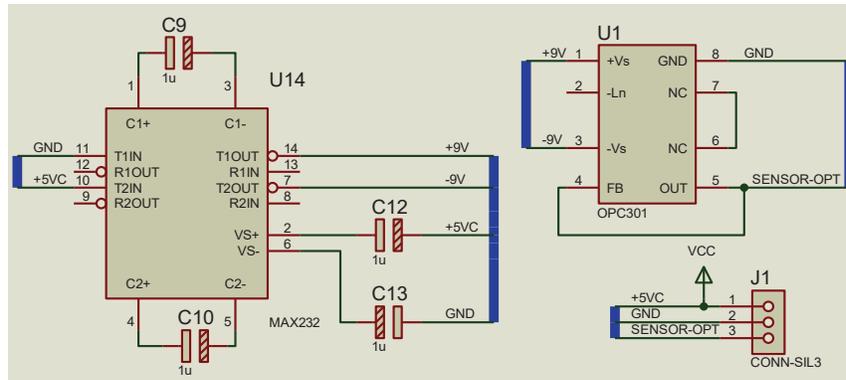


Figura 11. Diseño esquemático para control de transductor óptico.

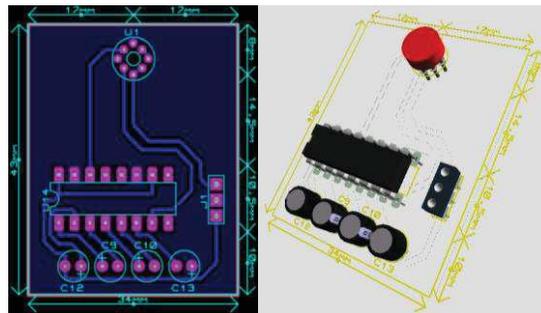


Figura 12. Diseño de PCB para control de transductor óptico.

### 3.6 Fuente de alimentación

El consumo de corriente del diodo láser de bombeo es de 370 mA, los motores consumen un promedio de 450 mA con picos de 700 mA a 1 A, los ventiladores empleados 300 mA, y los demás elementos con consumo de corriente despreciable; nos da una suma de 2.45 A con picos de 4.65 A máximo suponiendo que se tienen todos los elementos activos. Para cubrir estas necesidades, se ha diseñado una fuente de voltaje de 12 V y 5 V con capacidad de 4 A en cada voltaje. Se usan reguladores de voltaje 7812 y 7805, con encapsulado TO-220, que tienen una capacidad de 1 A. Con arreglos de resistencias de 0.1  $\Omega$  se realiza el circuito mostrado en las Figuras 13 y 14.

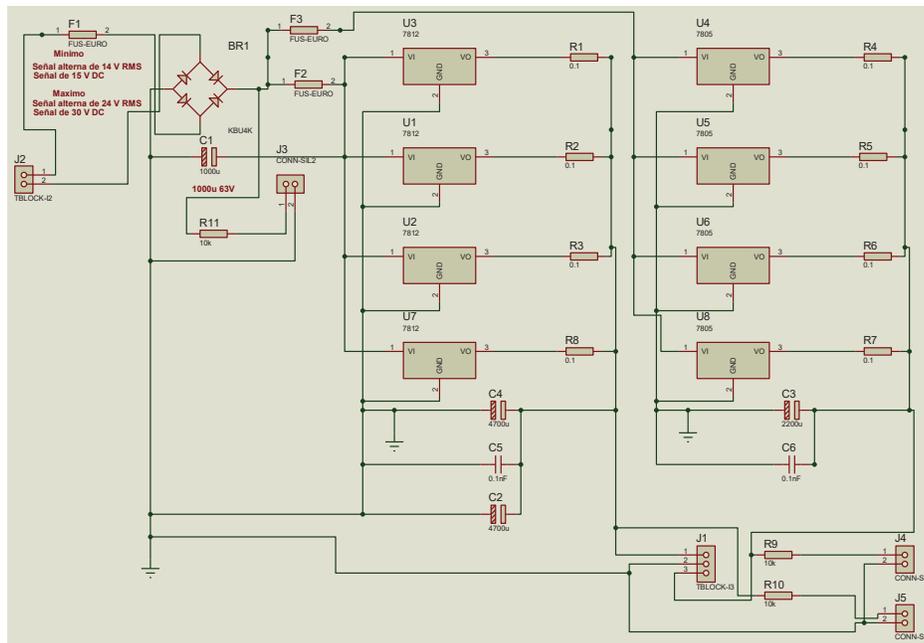


Figura 13. Diseño esquemático para fuente de alimentación.



Figura 14. Vista frontal del circuito.

Con esto se logra crear una fuente de voltaje económica y reducida, a necesidad del sistema, esto es importante ya que algunos reguladores de voltaje de alta corriente son más voluminoso y requieren de grandes disipadores y sistemas de enfriamiento; de no emplearse podrían provocar grandes temperaturas que agredirían a la integridad del resto de circuitos.

### 3.8 Tarjeta electrónica general

Una vez construidos los módulos necesarios para los actuadores y transductores, se diseña la tarjeta general que conecta todos los módulos y la MyRIO, para controlar el mecanismo. El diseño es modular, siendo únicamente un centro de distribución de datos de los módulos a la MyRIO. El diseño contiene dos capacitores y conectores hembra o macho según corresponda al diseño de los módulos y cables para manipular el mecanismo.

Se agrega un segundo ventilador para la fuente de alimentación, se usan LEDs indicadores, donde el rosa indica que recibe voltaje, el verde que los 12 V están siendo suministrados y el azul indica los 5 V. Se diseña una caja para colocar todos los elementos y dar ventilación a los circuitos, adicional a los disipadores de calor usados. Lo anterior se ilustra en las Figuras 15 y 16.



Figura 15. Tarjeta electrónica general actual en caja vista superior.



Figura 16. Tablero de control actual vista superior.

### 3.9 Ensamblaje final

Se agrega el cableado y se coloca el tablero con el mecanismo. La alimentación a la tarjeta MyRIO, es con una computadora utilizando el cable USB. La Figura 17 muestra el ensamble final y la Figura 18 el cableado del mecanismo. Con esto se concluye la etapa de diseño, maquinado y armado de los circuitos.

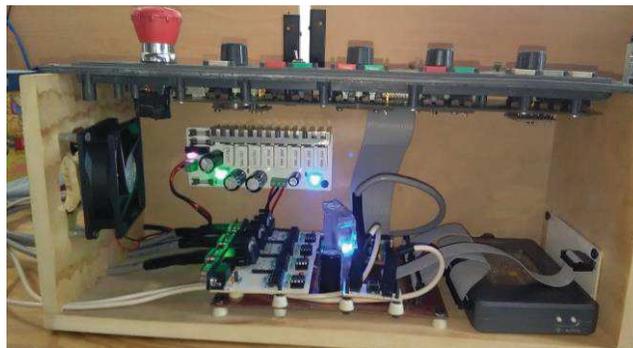


Figura 17. Ensamble final vista frontal, sistema encendido.

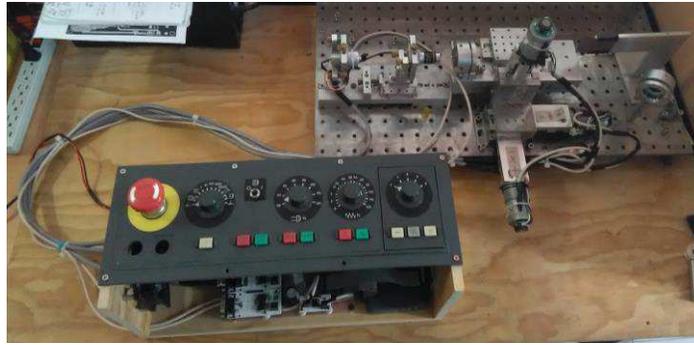


Figura 18. Mecanismo completamente cableado y funcional.

### 3.10 Programación

Al momento solo se ha presentado el control manual atendiendo al tablero de control. Ya que se emplea la MyRIO, se usa el software LABVIEW donde el usuario puede ver el valor y gráfica de cada una de las temperaturas, el valor actual del PWM y de los botones de acción, el valor del encoder de cada motor y el estado del freno de cada motor. Lo anterior se ilustra en la Figura 19. Se pretende desarrollar más el código para lograr la alineación automática.



Figura 19. Ventana interactiva al operador.

Gracias a los componentes con los que cuenta el software para el uso de un MyRIO se agrega las 4 salidas de PWM, las 4 entradas de encoder, las entradas analógicas para la temperatura y lecturas del sensor óptico, y entras y salidas digitales empleadas.



Para el control de temperatura se hace la conversión de la señal analógica a grados y se despliega tanto en dato numérico como en las gráficas. El control del láser debido a que es digital solo se manda la entrada a la salida directamente y se condiciona al paro de emergencia.

Al introducir la señal de paro se hace un cambio en el programa gracias a la finalización de un estructura WHILE y por un secuencial se va a las condiciones de paro que activa el freno apaga los PWM y hace el cambio en el láser y los LEDs indicadores de la MyRIO.

Debido a que los controladores de PWM y eje son seleccionadores de combinación binaria de hace la decodificación de los datos con multiplicaciones según el estado de la entrada y estructuras CASE que mandan el valor decimal real para emplearse en el PWM y el eje respectivamente. Lo anterior se observa en la Figura 20 en una forma sintetizada.

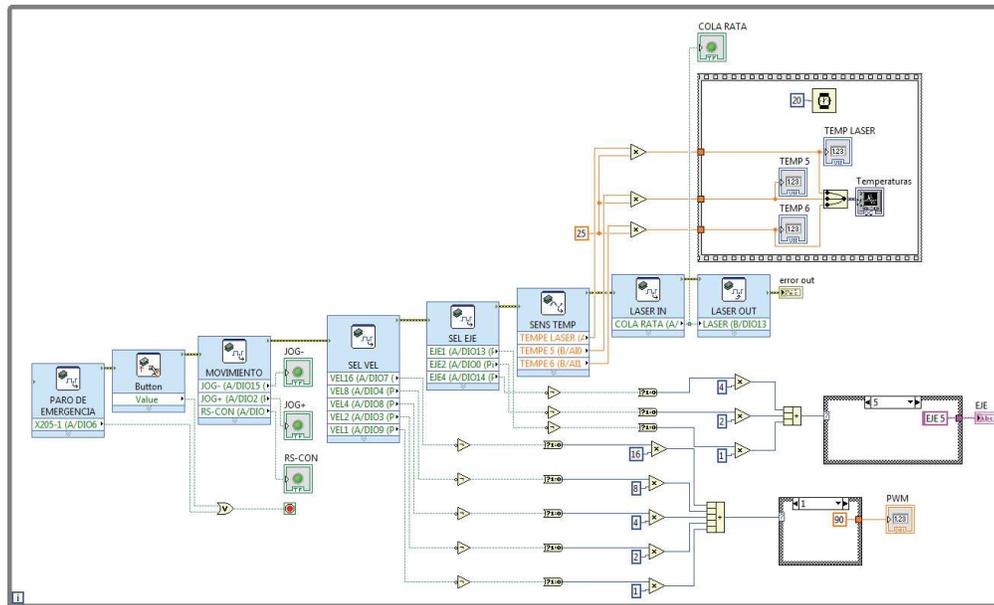


Figura 20. Programa preliminar.

Con esto logramos controlar el proceso manual operado con el tablero de control con lo que hemos logrado alinear a mano el láser de Bombeo con una marca blanca que se tiene en el mecanismo.

#### 4. Pruebas y resultados

Mediante el control manual se realiza una alineación básica del láser hacia un punto blanco del mecanismo; esto comprueba el funcionamiento de la tarjeta ya que en la pantalla se muestra la temperatura y posición de los ejes cumpliendo los objetivos.

La alineación del láser con el punto blanco se corrobora en la Figura 21. Y en la figura 22 se presenta la información de una captura de la interfaz del usuario en uno de los diseños beta que se realizaron.



Figura 21. Alineación de láser a punto.



Figura 22. Pantalla beta de LABVIEW activada.

Así se comprueba la tarjeta de control y se aprueba un primer desarrollo que permite hacer la radiografía y pruebas preliminares de funcionamiento para el mecanismo.

## 5. Conclusiones

La máxima temperatura registrada en el láser ha sido de 35°C y el resto se ha mantenido a temperatura ambiente. Las placas de control que se crearon funcionan en la etapa de potencia, siendo que los optoacopladores así como los amplificadores operacionales y demás circuitos funcionan; pero al momento de accionar los motores por el ruido eléctrico y los picos que se registran en la corriente las señales de temperatura se van a cero y los encoder mandan señales que generan brinco en los datos sin ninguna congruencia. Se deberá de seguir trabajando en el aspecto de ruido eléctrico y posiblemente en una fuente de voltaje de más capacidad o separar las alimentaciones de los componentes; para ellos se requiere de modificar la mayoría de los diseños actuales y experimentar nuevamente en tarjeta de prototipos.

El uso de tarjetas electrónicas en modo modular o escalera permite que el desarrollo del trabajo y evaluación de funcionamiento sea más práctico y económico ya que al momento de hacer evaluación o correcciones no es necesario remplazar grandes circuitos sino de forma particular se mapea y comprueba el funcionamiento de cada uno de los componentes de la tarjetas.

Mientras los motores están en paro el comportamiento del resto del equipo es ideal; y a pesar de los picos de corriente que generan los motores, cuando estos son accionados la fuente de alimentación nunca ha dejado caer el voltaje y mantiene constante el funcionamiento del todo.

Respecto a la temperatura de las tarjetas de control se logra normalizar a un máximo de 46°C en su punto más alto al ser sometidas a un periodo de dos horas de función los reguladores de voltaje. Finalmente se demuestra el funcionamiento y procesamiento de la MyRIO con el breve código generado para uso manual del mecanismo; es cierto que este se puede mejorar y puede evolucionar



mucho hasta llegar al punto de la alineación automatizada incluso con los pequeños errores que se ven actualmente, pero para esto es necesario colocar los sensores de límite en el mecanismo, así como los sensores ópticos.

Al terminar la parte mecánica con la colocación de sensores ópticos y sensores de límite de movilidad; se deberá de ampliar el programa de control para hacer control considerando las señales de estos transductores. Y finalmente ya se puede proseguir a hacer un proceso de control para automatizar el sistema y lograr así el objetivo máximo que es auto-alinear la fibra óptica de vidrio al laser.

## Referencias

- [1] D.V. Talavera, E. B. Mejía, "Blue up-conversion Tm<sup>3+</sup>-doped fiber laser pumped by a multiline Raman source", *Journal of Applied Physics*, Vol. 97, 2005, pp. 053102-1-053102-4.
- [2] D. V. Talavera, E. B. Mejía. "Holmium-Doped Fluoride Fiber Laser at 2950 nm Pumped at 1175 nm", *Laser Physics*, 2006, Vol. 16, No. 3, pp. 436-440.
- [3] Seugling, R. M., LeBrun, T., Smith, S. T., & Howard, L. P. (2002). A six-degree-of-freedom precision motion stage. *Review of Scientific Instruments*, 73(6), 2462–2468. <https://doi.org/10.1063/1.1476717>
- [4] P. Gao, S.-M. Swei, and Z. Yuan, "A new piezodriven precision micropositioning stage utilizing flexure hinges," *Nanotechnology*, vol. 10, no. 4, pp. 394–398, 1999.
- [5] J. Qu, W. Chen, J. Zhang, and W. Chen, "A large-range compliant micropositioning stage with remote-center-of-motion characteristic for parallel alignment," *Microsyst. Technol.*, vol. 22, no. 4, pp. 777–789, 2016.
- [6] W. Gao, S. Dejima, H. Yanai, K. Katakura, S. Kiyono, and Y. Tomita, "A surface motor-driven planar motion stage integrated with an XYθZ surface encoder for precision positioning," *Precis. Eng.*, vol. 28, no. 3, pp. 329–337, 2004.
- [7] K. Cai, Y. Tian, F. Wang, D. Zhang, X. Liu, and B. Shirinzadeh, "Design and control of a 6-degree-of-freedom precision positioning system," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 44, pp. 77–96, 2017.
- [8] DeCusatis, C. "*Fiber Optic Data Communication*" ELSEVIER, San Diego, California. Tercera ed, 2008, <https://books.google.co.ve/books?id=yvMx7mMgJAC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- [9] Fibra Óptica, INCOM, 2016, [https://www.incom.mx/documents/pdf/CATALOGO\\_INCOM\\_FIBRA\\_OPTICA.pdf](https://www.incom.mx/documents/pdf/CATALOGO_INCOM_FIBRA_OPTICA.pdf)
- [10] Discovery, B., The National Academies, N. A. Sciences, 2003, [http://www7.nationalacademies.org/spanishbeyonddiscovery/tec\\_007520-05.html](http://www7.nationalacademies.org/spanishbeyonddiscovery/tec_007520-05.html)
- [11] Seo, K., Nishimura, N., Shiino, M., Yuguchi, R., & Sasaki, h., Furukawa, 2003, [http://www.furukawa.co.jp/review/fr024/fr24\\_04.pdf](http://www.furukawa.co.jp/review/fr024/fr24_04.pdf)
- [12] Schultzkeck, M., Corning, 2011, <http://www.corning.com/opticalfiber/innovation/discovery/maurerschultzkeck/index.aspx>
- [13] BOYLESTAD., "*Introducción al análisis de circuitos*", PEARSON PRENTICE HALL, México, décima edición, 2004.
- [14] BOYLESTAD, NASHESKY, "*Electrónica*", PEARSON, México, décima edición, 2009.
- [15] H. Hayt, W., E. Kemmerly, J., & M. Durbin, S., "*Análisis de circuitos en ingeniería*", MC GRAW HILL, México, séptima edición, 2007.
- [16] OLGA, V. C., "*Electrotecnia*", THOMSON, Madrid, cuarta edición, 2004.
- [17] RASHID M.H., "*Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones*", PEARSON PRETICE HALL, México, tercera edición, 2004.
- [18] Ruiz Velazquez, T., Arbelaitz Gallego, O., Exteberria Uztarroz, I., & Ibarra Lasa, A., "*Análisis básicos de circuitos y electrónicos*", PEARSON PRETICE HALL, Madrid, 2004.
- [19] VIÑAS L. P., "*Circuitos y dispositivos electrónicos fundamentos de la electrónica*", UPC, Barcelona, 1997.



# Sistema de control de movimiento para servomotores de AC basado en Microcontrolador y LM628

Moreno Martínez Guillermo, Pedraza Ortega Jesús Carlos, Toledano Ayala Manuel,  
Rivas Araiza Edgar Alejandro.

Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de Las Campanas S/N, Col. Las Campanas, CP 76010.

## Resumen

*Los sistemas de control de movimiento son parte fundamental para la automatización en una amplia variedad de maquinaria como robots industriales, fresadoras y tornos de control numérico, así como maquinaria especializada. A nivel industrial se emplean dispositivos como PLC's y controladores de movimiento de altas prestaciones, pero muy costosos, lo cual dificulta el desarrollo de sistemas de automatización a la medida. En este trabajo se presenta el diseño de un sistema de control de movimiento embebido empleando un microcontrolador de 8 bits y un circuito integrado de control de movimiento comercial LM628, el cual es usado en combinación con un servo driver comercial para servomotores de AC. De esta manera se busca proveer un sistema de control accesible y sencillo para servomotores de AC, los cuales presentan numerosas ventajas con respecto a los tradicionales motores de CD de imán permanente.*

**Palabras clave:** Control de Movimiento, Microcontrolador, PID, Servomotor.

## 1. Introducción

Los sistemas de control de movimiento constituyen una parte fundamental en una gran variedad de máquinas automáticas, tales como robots industriales, fresadoras y tornos de control numérico, así como maquinaria especializada. El núcleo de un sistema de control de movimiento corresponde al controlador de movimiento, a nivel industrial existen soluciones para una gran variedad de aplicaciones utilizando controladores lógicos programables (PLC's) con hardware especializado el cual aunado a los dispositivos de potencia (drivers) presentan un costo elevado. En determinados casos los sistemas de control de movimiento basados en PLC's no cumplen los requerimientos para lograr la funcionalidad deseada en la maquinaria [Jin, 2008], por lo cual existen otras alternativas como las tarjetas de control de movimiento de arquitectura abierta que se emplean junto con una computadora personal (PC), y controladores de movimiento embebidos [Lq et al., 2013] que emplean una amplia variedad de dispositivos que van desde FPGA's, microcontroladores ARM y circuitos integrados de propósito específico [Ruili, 2010; Lq et al., 2013; K and S, 2015 y Jin, 2008].

En los controladores de movimiento, la estrategia de control más generalizada para control de velocidad y movimiento corresponde al controlador PID [Suman, 2016] debido a su sencillez, robustez y efectividad [He and Xu, 2007]. De igual forma los motores de corriente directa de imán permanente son el tipo de actuadores más comunes en máquinas industriales debido a su construcción simple, rigidez y facilidad para controlarlo, ya que solo requiere variar su voltaje de alimentación por medio de técnicas de modulación de ancho de pulso (PWM). Más recientemente, con los avances en las tecnologías de circuitos integrados y de teorías de control, se ha logrado implementar el control de movimiento usando motores de imán permanente sin escobillas (BLDC) o motores síncronos de imán permanente (PMSM, también llamados servomotores de AC) los cuales presentan una mayor eficiencia, mejores características de velocidad-torque, una vida operativa más larga, operación silenciosa, amplios rangos de velocidad, mejor relación par-peso y bajo costo de mantenimiento [Aware and Member, 2016]. La desventaja de este tipo de motores reside en la necesidad de implementar un controlador más complejo comparado con un motor de CD de imán permanente, por



tal motivo implementar un sistema de control de movimiento con servomotores de AC resulta muy costoso si se consideran los costos asociados al controlador de movimiento y la etapa de potencia (drivers).

El alto costo puede ser prohibitivo en determinadas aplicaciones, por tal motivo en este trabajo se propone el desarrollo de un sistema de control de movimiento empleando un controlador de movimiento basado en un microcontrolador de 8 bits y un circuito integrado de propósito específico, LM628, y una etapa de potencia empleando un driver comercial para servomotores de AC de la compañía ESTUN. De esta manera se espera obtener un sistema más económico para sistemas de control de movimiento de pequeño y mediano tamaño que no demanden elevada precisión, para lo cual se analizan las consideraciones de diseño, se describe la interface y programación de un controlador de movimiento de propósito específico con un servodriver comercial.

El documento está organizado de la siguiente manera: en la sección dos se presentan los materiales y métodos empleados para la realización del trabajo, describiendo las partes constitutivas más relevantes. Posteriormente en la sección 3 se muestran los resultados obtenidos, mientras que en la sección 4 se discuten los resultados. Finalmente en la sección 5 se presentan las conclusiones y trabajo futuro.

## 2. Materiales y métodos

El presente trabajo está basado principalmente en el uso del microcontrolador ATMEGA32 de la familia AVR de 8 bits de microcontroladores de Atmel, y el controlador de movimiento LM628 de Texas Instruments (antes National Semiconductor), dicho circuito permite captar señales de retroalimentación de posición a partir de un encoder óptico incremental con señales de cuadratura, implementar un controlador PID, generación de perfiles de movimiento trapezoidal y una salida de control analógica. El control de la operación del LM628 se realiza mediante comandos enviados desde el microcontrolador hacia el circuito a través de un bus de datos digital de 8 bits.

Para la etapa de potencia se planteó el uso de un driver para servomotores de AC de la serie ProNET (ProNET-15A) de la marca ESTUN, el cual entrega una potencia nominal de 1.5 KWatts a 220 VAC, y es controlado por una señal de control analógica dentro del rango -10 a +10 volts. El Servo Driver PRONET-15A puede operar en “Modo de Control de Posición de Contacto”, “Modo de Control de Posición”, “Modo de Control de Velocidad”, y “Modo de Control de Torque”. Para propósitos del presente trabajo se configuró el Servo Driver en Modo de Control de Velocidad, el cual a su vez tiene tres métodos para controlar la velocidad: Control de Velocidad Interna, Control por una Referencia Analógica de Voltaje, y Control de Velocidad de Contacto. Debido a que el controlador de movimiento LM628 tiene una salida digital de control de 8 bits conectada a un DAC (Digital to Analogical Converter), la señal de control que va conectada al Servo Driver es una señal de voltaje de -10 a +10 volts CD, por lo tanto, el modo en el que opera el Servo Driver es en Modo de Control de Velocidad por Referencia Analógica de Voltaje. La Figura 1 muestra el diagrama de bloques de las conexiones para el circuito de control y el Servo Driver.

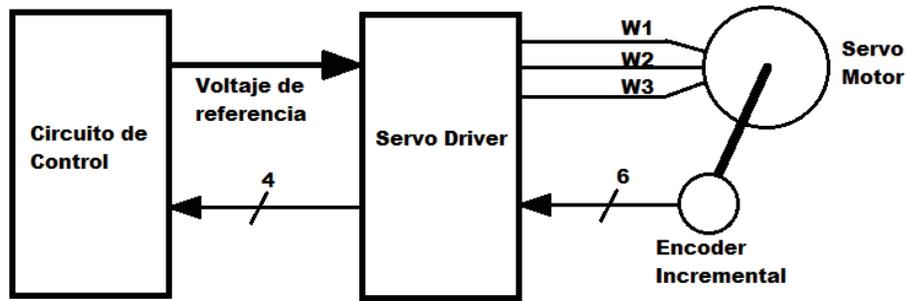


Figura 1. Diagrama de bloques de las conexiones entre el circuito de control, el Servo Driver y el Servo Motor.

El circuito de control consta principalmente de un microcontrolador (ATMEGA32) que se comunica con el controlador de movimiento (LM628) a través de los ocho pines del puerto C del microcontrolador. Adicionalmente la conexión entre el ATMEGA32 y el LM628 cuenta con seis señales al puerto de comunicación, las cuales sirven para controlar la lectura y escritura de comandos, además una de esas señales sirve para alertar al microcontrolador que una condición de interrupción ha ocurrido, y una señal de “reset”. A su vez el LM628 tiene tres señales de entrada para la lectura de un encoder óptico incremental. El modelo EMG-15-APA22 del servomotor empleado cuenta con un dispositivo de retroalimentación de posición basado en un encoder óptico incremental con interface de salida RS422 (señales diferenciales), de esta manera se obtiene una mayor inmunidad al ruido para transportar las señales usando cables largos.

Debido a que las señales del encoder son diferenciales se necesita un circuito receptor de línea diferencial, que puede ser el integrado AM26ls32A para obtener señales compatibles con TTL del circuito LM628. La salida del DAC (DAC0800) va conectada a un amplificador operacional que se puede configurar para aumentar la ganancia y ajustar la salida de voltaje a un rango de -10 a +10 volts CD, teniendo en cuenta que para voltajes negativos el eje del motor girará en sentido horario, y para voltajes positivos girará en sentido anti horario. La Figura 2 muestra el diagrama de bloques del circuito de control de movimiento.

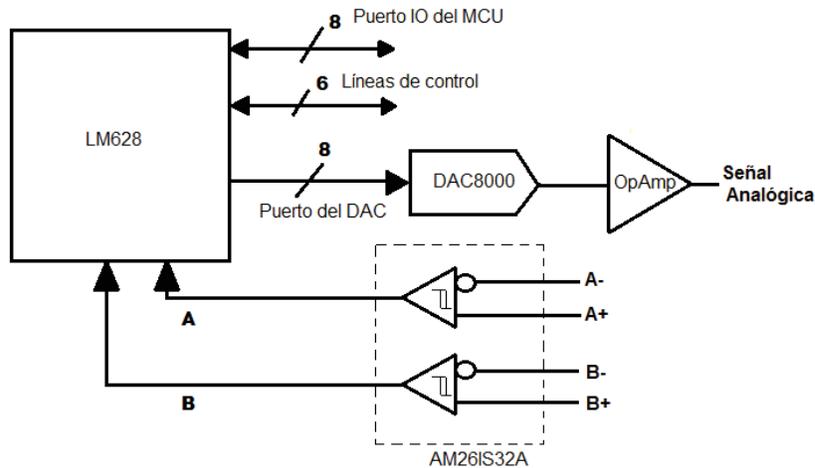


Figura 2. Circuito de control de movimiento con una señal analógica de voltaje.

### 2.1 Filtro PID



Internamente, el LM628 cuenta con un filtro digital PID que compensa el lazo de control. La versión de un controlador PID de tiempo continuo está dada por la ecuación:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

donde el error de seguimiento está dado por  $e(t)=w(t)-y(t)$ , y se entiende que  $y(t)$  es la variable manipulada o salida de proceso,  $w(t)$  es la señal de referencia o "Setpoint", y  $u(t)$  es la salida del controlador. Los parámetros del controlador PID son los siguientes: la ganancia proporcional  $K_p$ , la constante de tiempo integral  $T_i$ , y la constante de tiempo derivativo  $T_d$ .

Para obtener la versión digital de un controlador PID en tiempo discreto debemos discretizar los componentes integral y derivativo de la ecuación (1). Cuando el periodo de muestreo  $T_0$  es pequeño el algoritmo más simple es obtenido reemplazando la derivada con una diferencia de primer orden

$$\frac{de}{dt} \approx \frac{e(k) - e(k-1)}{T_0} = \frac{\Delta e(k)}{T_0} \quad (2)$$

donde  $e(k)$  es el valor del error al k-ésimo momento de muestreo, por ejemplo en el tiempo  $t=k*T_0$ . La forma más fácil de aproximar la integral es simplemente sumando, tal que aproximemos la función de tiempo continuo muestreando en periodos de  $T_0$  [Bobál, Böhm, Fessel y Macháček, 2005].

$$\int_0^t e(\tau) d\tau \approx T_0 \sum_{i=1}^k e(i-1) \quad (3)$$

tal que la ecuación para el controlador PID en tiempo discreto tiene la forma

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T_0}{T_i} \sum_{i=1}^k e(i-1) + \frac{T_D}{T_0} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (4)$$

La ecuación (4) puede reescribirse de la siguiente forma:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{i=0}^k e(i) + K_d [e(k') - e(k' - 1)] \quad (5)$$

donde  $e(k)$  es el error de posición en el tiempo de muestro  $k$ , mientras  $k'$  indica el muestreo a la velocidad del muestro derivativo, y  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  son los parámetros del filtro PID asignados por el usuario.

## 2.2 Perfil de Velocidad Trapezoidal



Son llamados perfiles de velocidad por la razón de que una nueva posición deseada es calculada cada intervalo de tiempo. Para velocidad constante los incrementos de la posición deseada serán los mismos a cada intervalo de tiempo, para aceleración y desaceleración los incrementos de la posición deseada incrementarán o decrecerán, respectivamente, para cada intervalo de tiempo. Esto genera una gráfica de velocidad respecto al tiempo como la que se muestra en la Figura 3.

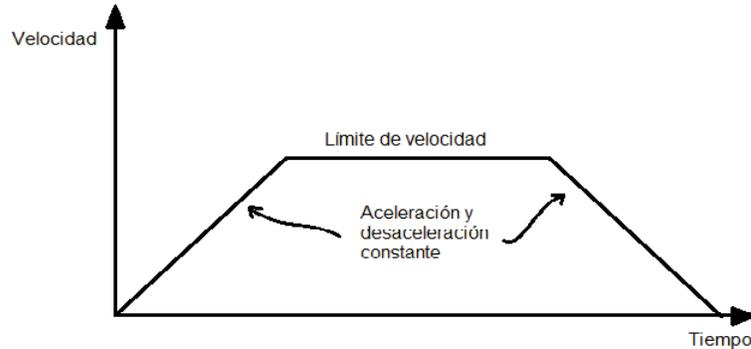


Figura 3. Perfil de velocidad estándar.

El perfil de velocidad asegura que el motor inicie y termine la trayectoria con un movimiento “suave”, es decir que no arranque o se detenga abruptamente, lo cual es muy importante ya que no existen picos de corriente que puedan dañar al servo motor o al servo driver, por otra parte, ayuda a que los componentes mecánicos unidos a la fecha del motor prolonguen su vida útil.

Los valores de los parámetros de la trayectoria que maneja el LM628 son datos de 32 bits. La posición es un valor entero con signo que va de  $-2^{30}$  (C0000000 hex) hasta  $2^{30}$  (3FFFFFFF hex). La velocidad y la aceleración son valores positivos con una parte entera y una parte fraccional de 16 bits cada una. El cálculo de los parámetros se hace de la siguiente forma:

$$P = 4 \cdot R \cdot NR$$

$$V = R \cdot T \cdot C \cdot VD \cdot F$$

$$A = R \cdot T \cdot T \cdot AD \cdot F$$

donde:

- P = Posición (Valor del parámetro).
- V = Velocidad (Valor del parámetro).
- A = Aceleración (Valor del parámetro).
- R = Líneas del encoder.
- NR = Número deseado de revoluciones.
- T = Periodo de muestreo =  $341\mu\text{s}$  (para un reloj de 6MHz).
- C = Factor de conversión =  $1/60$ .
- VD = Velocidad deseada (rpm).
- F = Factor de escalamiento = 65536.
- AD = Aceleración deseada ( $\text{rev/s}^2$ ).

### 2.3 Interfaz gráfica



Con la finalidad de programar las trayectorias de movimiento, cargar los valores de las ganancias del controlador PID y monitorear el movimiento del motor se creó una interfaz gráfica en *Visual Studio* programada en el lenguaje C#, la cual se comunica con el microcontrolador a través del UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) conectado a un circuito convertidor de UART a interface USB de tal manera que se puede disponer de un puerto serie virtual en una computadora personal. Los datos que se envían de la computadora al circuito de control son transmitidos en una trama de mensaje, la Figura 4 muestra cómo está organizada la información en el mensaje.

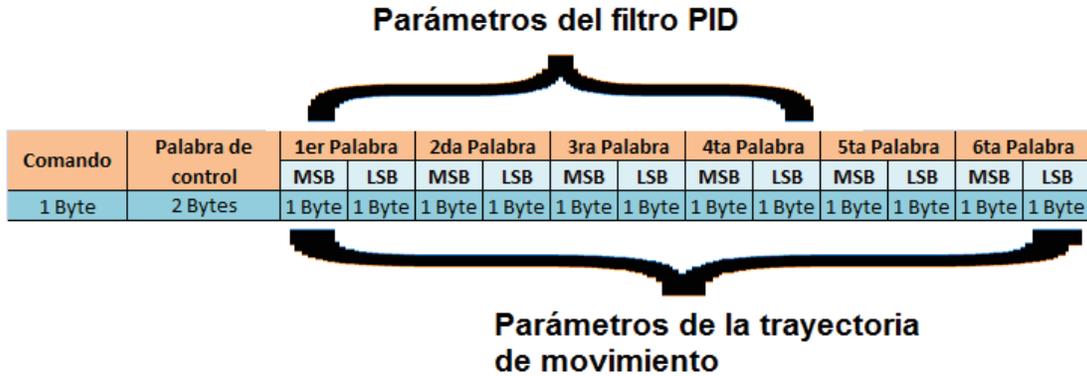


Figura 4. Trama de mensaje para el envío de datos de la computadora al circuito de control.

### 3. Resultados

Los alcances del trabajo en esta etapa permitieron realizar el control de posición de un servo motor usando el circuito de control y la interfaz de usuario creada en lenguaje de programación C#. Al encender el circuito de control, primero se envía un comando de “reset” del controlador de movimiento (LM628), después se carga el valor de la ganancia proporcional  $K_p$  con un valor predeterminado de 50, e inmediatamente después se cargan los valores de la trayectoria con un “Set-point” de cero, asegurando de esta forma que al encender el sistema el motor quede en la posición anterior, es decir, que al encender el circuito de control y de potencia, el motor no realice ningún movimiento.

Ya que el encoder es de tipo incremental, el circuito de control no guarda la posición anterior, por lo tanto, la posición actual en el momento de arranque se considera como la posición cero. La interfaz gráfica desarrollada contiene tres pestañas: la primera es la configuración del puerto serial emulado por USB desde la cual se comunica la computadora con el sistema de control de movimiento, la segunda contiene los ajustes de los parámetros del filtro PID, y la tercera los ajustes de los parámetros de la trayectoria (posición, velocidad y aceleración).

En la Figura 5 podemos observar la configuración del puerto serial de comunicación, en la cual se puede seleccionar: el puerto de comunicación, velocidad de transmisión de datos, bits de datos, la paridad, y los bits de paro. Al abrir el programa, se cargan los parámetros de la configuración predeterminados para la comunicación, por lo tanto, sólo se tiene qué seleccionar el puerto a través del cual se comunica la computadora con el circuito de control. También contiene botones para conectar y desconectar el puerto serial, y dos cuadros de texto; uno donde se pueden enviar datos y otro donde se leen los datos que se envían del circuito de control a la computadora.

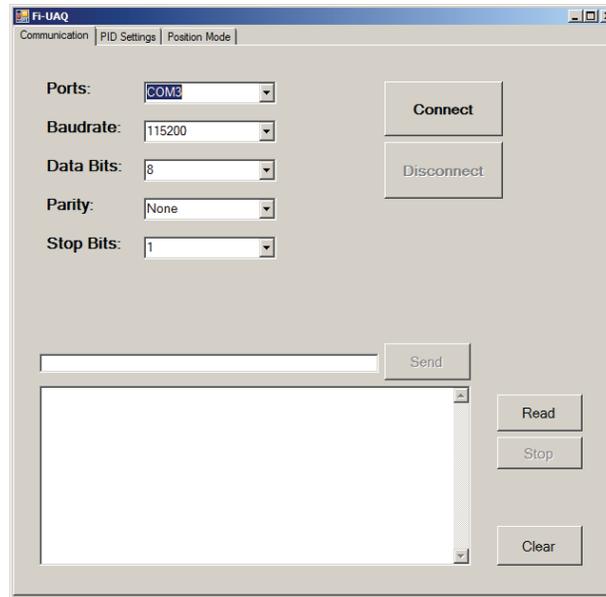


Figura 5. Parámetros de configuración del puerto serial.

La Figura 6 muestra la configuración de los parámetros del filtro PID, donde se puede seleccionar qué valores se van a actualizar, además existen dos parámetros más, que son: el límite de integración, que es un valor que satura el valor de la ganancia integral del controlador, y el intervalo de muestreo del término derivativo del controlador. Sin embargo, estos dos últimos valores no se han configurado, por lo tanto, contienen sus valores predeterminados, que para el caso del límite de integración es el valor máximo de la ganancia integral, mientras que para el intervalo de muestreo es de  $256\mu\text{s}$  (valor programable por medio de comandos).

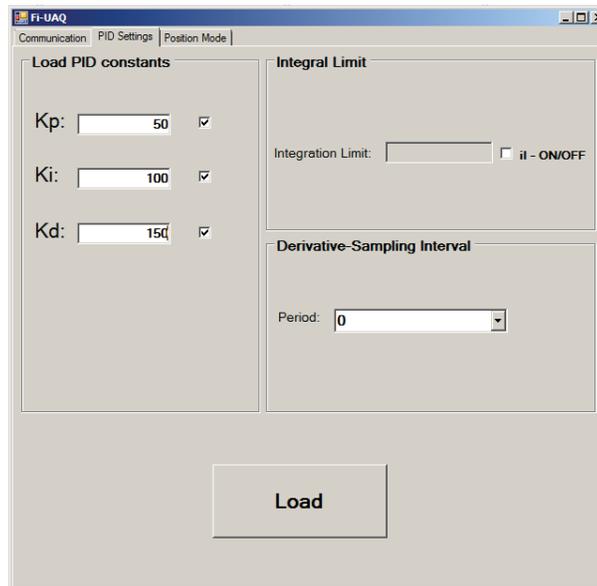


Figura 6. Configuración de parámetros del filtro PID.

En la Figura 7 se muestra la configuración de la trayectoria del motor, donde se pueden cargar los valores para la aceleración, velocidad y número de cuentas del encoder. Además una gráfica que nos muestra el perfil de velocidad del motor durante la trayectoria.

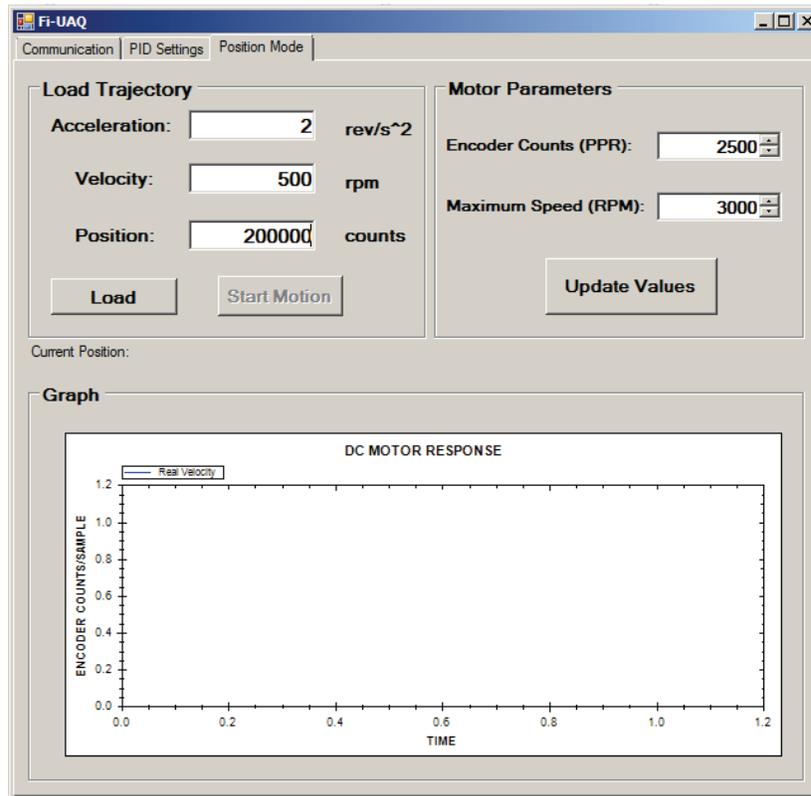


Figura 7. Configuración de los parámetros de la trayectoria de movimiento.

Para realizar la trayectoria de movimiento se debe cargar el valor de aceleración, velocidad y posición. En la figura 8 se muestra el perfil de velocidad de una trayectoria de 200,000 cuentas a una velocidad de 500 rpm y una aceleración de 2 rev/s<sup>2</sup>. La gráfica muestra la velocidad en número de cuentas por intervalo de muestreo, la cual se calcula empleando la fórmula de la ecuación (7). Podemos validar que los valores de la gráfica corresponden al número de revoluciones por minuto, despejando VD de (7) pero sin considerar el factor de escalamiento F:

$$VD = \frac{V}{R \cdot T \cdot C}$$

$$VD = \frac{29}{(10000)(0.000341)\left(\frac{1}{60}\right)} \approx 510$$

Como se puede observar, la velocidad máxima alcanzada por el motor corresponde a la velocidad deseada con un pequeño error. El valor esperado es de 28.41. Este error podría reducirse ajustando las ganancias del PID.

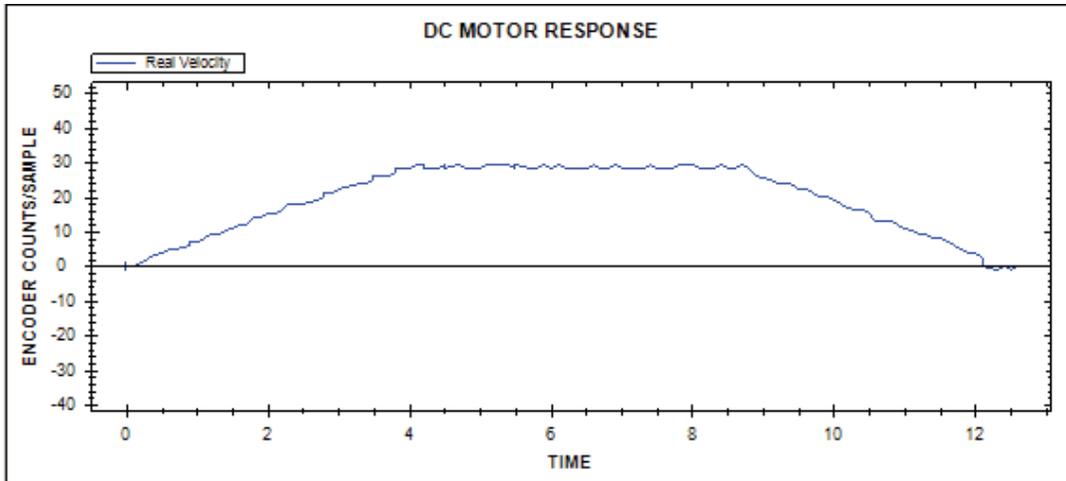


Figura 8. Perfil de velocidad de la trayectoria de movimiento del motor en sentido anti-horario.

Cabe mencionar que los valores de la velocidad son cantidades con signo; cuando la flecha del motor gira en sentido anti-horario (+) la velocidad es una cantidad positiva, mientras que cuando el giro de la flecha es en sentido horario (-), el valor de la velocidad es negativo. La Figura 9 muestra la trayectoria del motor, pero de regreso a la posición cero.

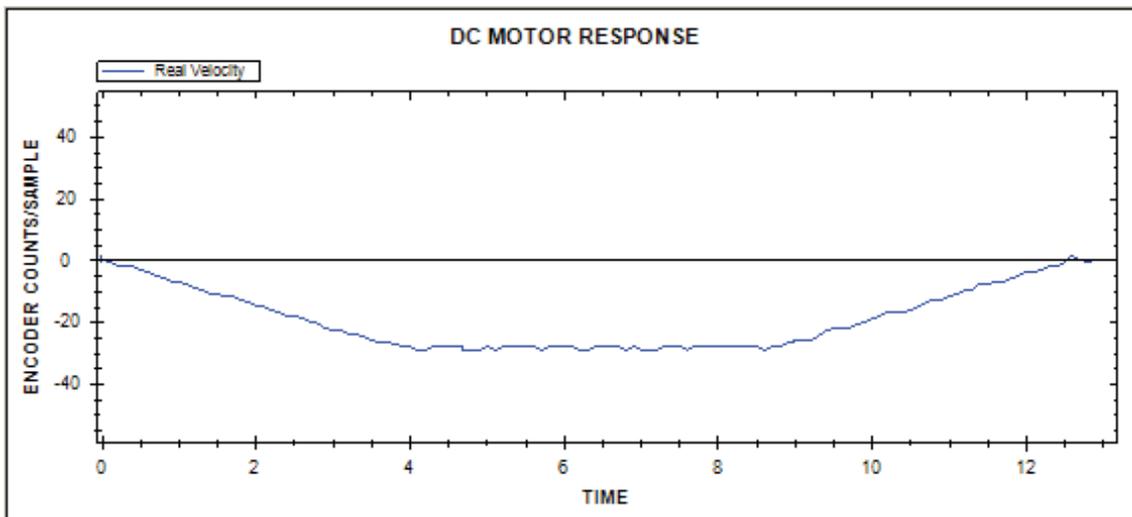


Figura 9. Perfil de velocidad de la trayectoria de movimiento del motor en sentido horario.

Las pruebas del sistema fueron realizadas en una tarjeta de prototipos, mientras que la etapa de potencia comprende un tablero eléctrico con las conexiones y dispositivos de protección necesarias. En la Figura 10 se observa el acabado del tablero de control, el cual incluye el servo driver, relevadores de interface e interruptores de protección de sobrecorriente, y la tarjeta de prototipos conectada a la computadora.

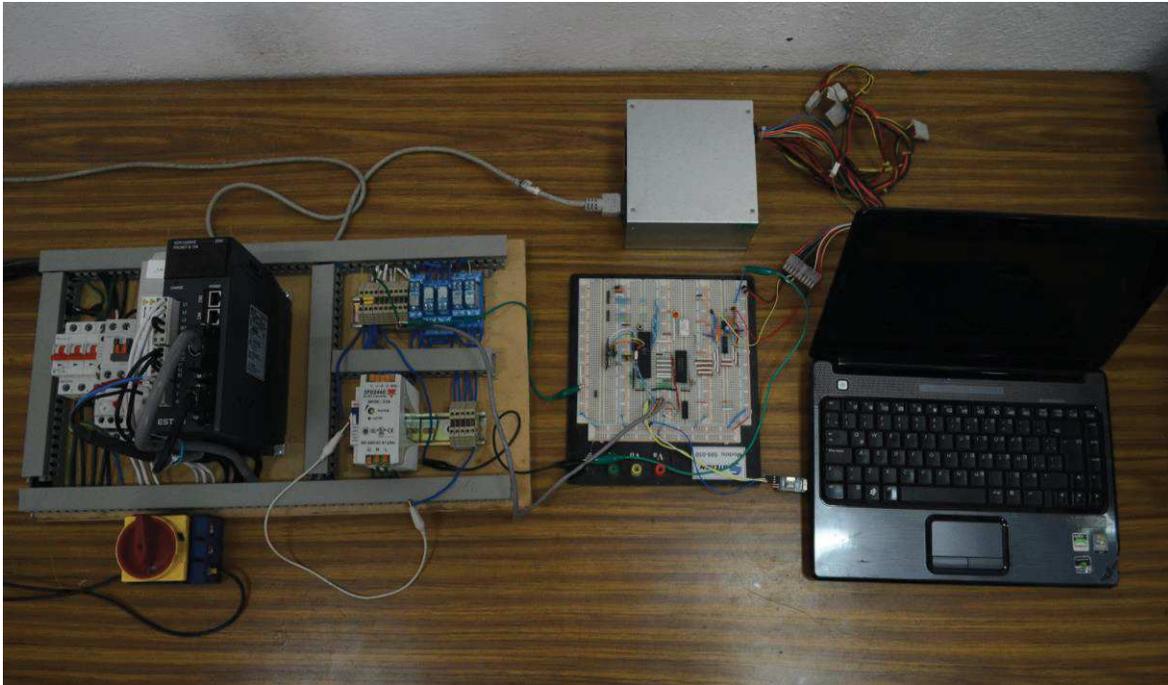


Figura 10. Sistema de control de movimiento desarrollado.

#### 4. Discusión

Con el trabajo desarrollado fue posible controlar la posición, velocidad y aceleración de un servomotor de AC mediante un circuito electrónico de bajo costo basado en un microcontrolador y un controlador de movimiento (LM628). Mediante la interfaz gráfica se pudo establecer comunicación entre el circuito de control y la computadora, para así de esta forma cargar los parámetros de las trayectorias de movimiento. Cabe mencionar que durante las pruebas realizadas no se llevó a cabo una correcta sintonización del control PID, por lo cual se presentaban pequeños errores de posición, sin embargo, dichos errores se podrían considerar despreciables. Por otra parte, es importante señalar que valores muy grandes en la ganancia  $K_p$  de filtro (mayores a 100) pueden llegar a ocasionar sobrepasos en la posición del servomotor, lo cual tiene como consecuencia que el motor comience a oscilar antes de alcanzar la posición final, y esto podría ocasionar daños tanto en el motor como en los elementos mecánicos conectados al mismo.

Para cargar los valores de la trayectoria de movimiento siempre es importante tener en cuenta la aceleración y el tiempo en que realizará la trayectoria, ya que cuando se usan aceleraciones muy altas el motor se detiene abruptamente. En cuanto a la interfaz gráfica y al circuito de control, operan con los comandos básicos del controlador de movimiento. Para trabajos futuros se pretende agregar más acciones al sistema de control del servomotor para asegurar una completa funcionalidad para su uso como un control numérico por computadora (CNC).

#### 5. Conclusiones

En este trabajo se presenta una alternativa a un sistema de control de movimiento usando servomotores de AC en lugar de los tradicionales motores de CD. El uso de un servo driver comercial permite el control de velocidad de manera confiable y segura de los servomotores, mientras que el controlador de movimiento implementa un lazo de control con PID para posicionamiento preciso. Aunque el servo driver y el motor usado tienen un elevado costo, se obtiene un ahorro al integrarlo con un controlador de movimiento sencillo basado en un microcontrolador y un circuito de propósito



específico. De esta manera se obtiene un dispositivo programable que puede ser empleado para tareas de control de movimiento en una gran variedad de aplicaciones que no demanden controladores de movimiento muy complejos y costosos. Como trabajo futuro se pretende integrar el sistema de control de movimiento en un sistema de automatización de una máquina para laminado de cantera.

## Referencias

- [1] Bobál V., Böhm J., Fessel J. y Macháček J. (2005). Digital Self-tuning Controllers: p. 54-57. Alemania: Springer.
- [2] Aware, M. V, and S. Member, 2016, Design and Tuning of Fractional Order PID Controller for Speed control of Permanent Magnet Brushless DC Motor: no. Cmi, p. 326–330.
- [3] He, S., and X. Xu, 2007, Hardware / Software Co-design of an ADALINE Based Adaptive Controller for a DC Motor: p. 182–186.
- [4] Jin, M., 2008, Research of Embedded Motion Controller for Construction Machinery \*: p. 201–206, doi:10.1109/SEC.2008.9.
- [5] K, R. D., and V. K. S, 2015, Three-Dimensional Motion Control using Embedded Controller and FPGA Technology: v. 0, no. December 2008, p. 20–22.
- [6] Lq, L., E. Rq, and P. Frqwuro, 2013, (pehgghg Orwlrq &rqwuroohu 'hvljq %dvhg 2q 57(; 1hwzrun: v. 57, p. 326–329, doi:10.1109/IHMSC.2013.225.
- [7] Ruili, C., 2010, Developing and Research on Motion Controller Based on LM628: p. 4–6.
- [8] Suman, S. K., 2016, SPEED CONTROL OF DC MOTOR USING OPTIMIZATION TECHNIQUES BASED PID: no. March.





# Manual de prácticas de laboratorio para la enseñanza de diseño mecatrónico

Díaz Hernández Octavio, Bernal Díaz Arcelia, Souza Jiménez José Antonio y  
Martínez Zamudio Patricio

Facultad de Estudios Superiores Aragón  
Universidad Nacional Autónoma de México

## Resumen

*La enseñanza es un reto, sobre todo cuando se deben transmitir conocimientos prácticos y de aplicación a partir de temas teóricos. En el contexto más general, en la enseñanza de la ingeniería es fundamental plasmar los conceptos de las clases en prácticas que ayuden a consolidar lo aprendido en las aulas de clase. De esta manera, los laboratorios de las diferentes asignaturas son los encargados de tener el espacio, el equipo y las herramientas para llevar a cabo una serie de prácticas que pueden ser estándar o tener cierta libertad para plantearlas conforme se imparte la teoría. Con esto en mente, un manual de prácticas puede ser una guía en el planteamiento ordenado de los conceptos teórico-prácticos que se pueden plasmar en la realidad y que a su vez pueden ser modificados para nuevos retos que necesite la sociedad en general. Por lo que en este trabajo se proponen doce prácticas sobre los temas de interés general en el ámbito de la mecatrónica. Se usa el contexto de una asignatura de Diseño mecatrónico, contenida en el plan de estudios de Ingeniería mecatrónica, impartida en la Universidad Nacional Autónoma de México. Se plantean objetivos a seguir para que el profesor pueda elegir la aplicación o permitir al alumno resolver algún problema o necesidad empleando las herramientas disponibles en el mercado, o bien, aplicando conceptos de otras asignaturas precedentes. Se obtuvieron resultados con base en un grupo particular de alumnos que realizaron las prácticas propuestas durante un semestre de clases.*

**Palabras clave:** Manual, Prácticas de laboratorio, Diseño Mecatrónico, Enseñanza.

## 1. Introducción

La mecatrónica es un área clave y estratégica de desarrollo en la sociedad moderna, debido a su naturaleza multidisciplinaria, científica y práctica le permite: generar y aplicar conocimientos y/o tecnologías a problemas reales del entorno. De esta forma permite la automatización de procesos optimizados en tiempo, costos y con calidad competitiva. Mecatrónica es una ingeniería multidisciplinaria de carácter científico y tecnológico que integra las áreas de mecánica, electrónica, informática, control automático y administración de proyectos, con el auxilio de otras áreas del conocimiento para analizar, diseñar, desarrollar, e innovar sistemas electromecánicos con la finalidad de mejorar la calidad, flexibilidad, bajos costos y productividad de procesos y productos dentro de una amplia gama de aplicaciones científicas, industriales servicios comerciales, sistemas médicos, entre otros, para beneficiar e impactar a todos los sectores de la sociedad [1-2]. En un sistema mecatrónico se integran componentes mecánicos, electrónicos y de programación, donde se incluyen aspectos de control automático e inteligente. Reconociendo que estas tres áreas de la ingeniería son los elementos constitutivos de los sistemas mecatrónicos.

Por otra parte, el diseño es la concepción original de un objeto u obra destinados a la producción en serie. El diseño se dedica a proporcionar una o varias soluciones para definir un producto o máquina de forma que satisfaga los requisitos y restricciones establecidas [3]. Teniendo en cuenta que el diseño puede aplicarse a distintas ramas de la ingeniería, el *Diseño Mecatrónico* es una especialidad del diseño y las instituciones de educación superior están al tanto de que el diseño mecatrónico es fundamental



para la formación de ingenieros mecatrónicos, de tal forma que los planes de estudio de diferentes universidades lo contemplan de alguna forma [4].

A pesar de las creencias actuales, el diseño mecatrónico o equivalente debe basarse en los conocimientos adquiridos durante un plan de estudios balanceado en las tres áreas, de tal forma que esta asignatura se oriente hacia el análisis y la aplicación de dichos conocimientos. Por lo que el alumno requerirá cursar asignaturas clasificadas como de “ciencias de la ingeniería” tales como mecánica de sólidos, mecanismos, instrumentación, electrónica básica, circuitos digitales, control, programación, entre otras. Por lo que este trabajo propone una serie de prácticas que permiten al alumno fortalecer su capacidad de síntesis y de resolución de problemas con conocimientos previamente adquiridos. Se cubrirán las tres áreas de estudio empleando prácticas con objetivos generalizados, pero con metas y alcances libres de determinar por el profesor.

## **2. Sistemas mecatrónicos**

A continuación, se escriben antecedentes generales de cada uno de los subsistemas de la mecatrónica, recalando que son parte de un sistema integral. Las ventajas de que trabajan en conjunto son múltiples, pero por mencionar una es que se pueden compensar posibles fallas entre sí y mejorar la respuesta del sistema.

### **2.1 Subsistemas mecánicos**

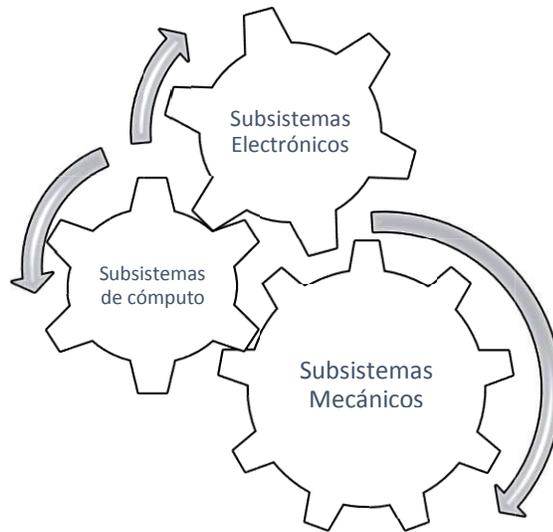
La mecánica es la rama de la física que estudia y analiza el movimiento y reposo de los cuerpos, y su evolución en el tiempo, bajo la acción de fuerzas. El conjunto de disciplinas que abarca la mecánica convencional es muy amplio y es posible agruparlas en cuatro bloques principales: Mecánica Clásica, Mecánica Cuántica, Mecánica Relativista, y Mecánica Cuántica de Campos. La mecánica clásica está formada por áreas de estudio que van desde la mecánica del sólido rígido y otros sistemas mecánicos con un número finito de grados de libertad, a sistemas como la mecánica de medios continuos (sistemas con infinitos grados de libertad). Existen dos formulaciones diferentes, que difieren en el grado de formalización para los sistemas con un número finito de grados de libertad: a) Mecánica newtoniana y b) Mecánica analítica. Mecánica newtoniana. Dio origen a las demás disciplinas y se divide en varias de ellas: la cinemática, estudio del movimiento en sí, sin atender a las causas que lo originan; la estática, que estudia el equilibrio entre fuerzas y la dinámica que es el estudio del movimiento atendiendo a sus orígenes: las fuerzas. Es en este contexto donde las ingenierías aplican conceptos y resolución de problemas [5].

### **2.2 Subsistemas electrónicos**

Electrónica es la ciencia que estudia sistemas cuyo funcionamiento se basa en la conducción y el control del flujo de los electrones, particularmente en semiconductores. Se divide en electrónica analógica y digital, la primera estudia los sistemas cuyas variables (tensión, corriente, etcétera) varían de una forma continua en el tiempo y pueden tomar (al menos teóricamente) valores infinitos. Y la segunda estudia los sistemas cuyas variables que sólo pueden tomar valores discretos y tienen siempre un estado perfectamente definido [6].

### **2.3 Subsistemas de cómputo: programación y control**

Esta área de la ingeniería es una ciencia que implica metodologías y tecnologías dedicadas a almacenar, procesar y transmitir información y datos en formato digital, la cual se ha desarrollado a partir de la aparición de tecnologías como el circuito integrado, el Internet y el teléfono móvil. Por otro lado, la ingeniería de control aplica la teoría de control para diseñar sistemas con comportamientos requeridos. En la práctica, el control requiere utilización de sensores para medir el funcionamiento del dispositivo, y en caso de presentar errores, ejecutar acciones con los actuadores para llegar al rendimiento esperado. De naturaleza multidisciplinaria, la ingeniería de control se enfoca principalmente en la implementación de sistemas de control a partir de modelamientos matemáticos y para lograr los fines del control, se requiere normalmente de la programación [5-6].



**Figura 1. Subsistemas de la mecatrónica.**

Los sistemas mecatrónicos deben ser diseñados integralmente, además cada subsistema elegido debe estar fundamentado con las bases de las ciencias de la ingeniería. Con respecto a la investigación de la literatura, encontramos que es de relevancia este tipo de herramientas educativas para un mejor desempeño del alumno [7-12].

### 3. Desarrollo

A continuación, se muestran la lista de prácticas, los objetivos y algunos ejemplos de resultados preliminares de este manual de prácticas propuesto.

#### 3.1 Listado de prácticas.

A partir de algunos temas teóricos elementales de las diferentes áreas, se han propuesto las prácticas que se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Prácticas.**

Secuencia	Descripción
Práctica 1	Engranés
Práctica 2	Biela manivela
Práctica 3	Levas
Práctica 4	Transmisión de movimiento
Práctica 5	Medición de velocidad
Práctica 6	Medición de posición
Práctica 7	Medición de corriente
Práctica 8	Medición de variable física ambiental
Práctica 9	Control por corriente
Práctica 10	Control velocidad
Práctica 11	Control posición
Práctica 12	Comunicación maestro-esclavo



### **3.2 Objetivos de las prácticas.**

A continuación, se muestran los objetivos de las prácticas, haciendo énfasis en que los alcances de cada práctica y las aplicaciones son libres.

#### **Práctica 1. Engranés**

Objetivo

Aplicar conocimientos sobre las relaciones de velocidad y ángulo entre engranes para la síntesis de un mecanismo con movimiento circular simple.

#### **Práctica 2. Biela-manivela**

Objetivo

Plantear y fabricar un mecanismo de aplicación que contenga un mecanismo de biela-manivela.

#### **Práctica 3. Leva**

Objetivo

Inventar y fabricar un mecanismo de aplicación que contenga un mecanismo con levas.

#### **Práctica 4. Transmisión de movimiento**

Objetivo

Concebir y fabricar un mecanismo de aplicación donde se transmita movimiento desde un eje conductor hacia un eje conducido.

#### **Práctica 5. Medición de velocidad**

Objetivo

Instrumentar electrónicamente un mecanismo para tomar mediciones de velocidad lineal o angular y desplegar el resultado.

#### **Práctica 6. Medición de posición**

Objetivo

Instrumentar electrónicamente un mecanismo lineal o angular para adquirir mediciones de posición lineal o angular y desplegar el resultado.

#### **Práctica 7. Medición de corriente**

Objetivo

Instrumentar electrónicamente un mecanismo para tomar mediciones de corriente que requiere un actuador eléctrico y desplegar el resultado.

#### **Práctica 8. Medición de variable física ambiental**

Objetivo

Instrumentar electrónicamente algún sistema para registrar mediciones de alguna variable física a elegir, como temperatura, humedad, luz, pH, u otra. Además, se solicita que se pueda monitorear dicha variable continuamente con el fin de registrar cambios al momento que ocurran y emitir una alarma, u otra acción.

#### **Práctica 9. Control por corriente**

Objetivo

Implementar un algoritmo de control que desenergice a un actuador eléctrico cuando su consumo de corriente exceda una referencia arbitraria. El algoritmo debe estar incluido en alguna aplicación.

#### **Práctica 10. Control de velocidad**

Objetivo

Implementar un algoritmo de control que mantenga la velocidad angular de acuerdo a una referencia arbitraria a pesar de perturbaciones al sistema. El algoritmo debe estar incluido en alguna aplicación.

### Práctica 11. Control de posición

#### Objetivo

Implementar un algoritmo de control que mantenga la posición angular o lineal de acuerdo a una referencia arbitraria, a pesar de perturbaciones al sistema. El algoritmo debe estar incluido en alguna aplicación.

### Práctica 12. Comunicación maestro-esclavo

#### Objetivo

Elegir y emplear un tipo de comunicación alámbrica o inalámbrica para comunicación entre dos dispositivos, uno (maestro) que envíe los valores de referencia para control de velocidad (práctica 10) y para el control de posición (práctica 11), y el otro (esclavo) que reciba dichas referencias y ejecute los algoritmos de control correspondientes sobre el sistema mecánico, previamente instrumentado. El algoritmo debe estar incluido en alguna aplicación.

### 3.3 Ejemplos de prácticas realizadas por los alumnos

A continuación, se registran algunos ejemplos de las diferentes prácticas realizadas en el contexto de un curso semestral de Ingeniería Mecatrónica, comprendido entre agosto y diciembre de 2015.

A continuación, se muestran algunos ejemplos. Notar que algunas de las imágenes son tomadas de videos que los alumnos realizaron para reportar sus prácticas en un grupo de formato electrónico, montado en una red social.

Práctica 1. Engranajes. En este caso se solicitó manufacturar un engranaje simple con relación 2:1, sin actuadores, como la práctica inicial. Haciendo el énfasis sobre la importancia del mecanismo y sus parámetros de diseño. Ver Figura 2. Se empleó un software de diseño mecánico y la técnica de "Corte laser" y material MDF (*Medium-Density Fibreboard*).

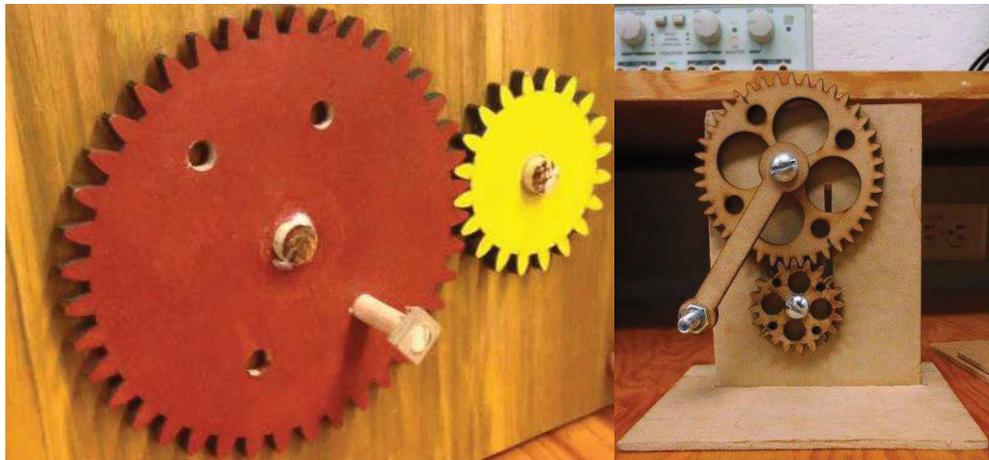


Figura 2. Ejemplos de engranajes planos, relación 2:1.

Práctica 2. Biela-manivela. Se pidió que buscaran aplicaciones de este mecanismo ampliamente usado y que se construyera. En la Figura 3 se muestran dos aplicaciones: una sierra y un compactador de envases. Se usaron distintos materiales y técnicas por los diferentes equipos. Aquí se muestran piezas de MDF, servomotor, una sierra, entre otros.

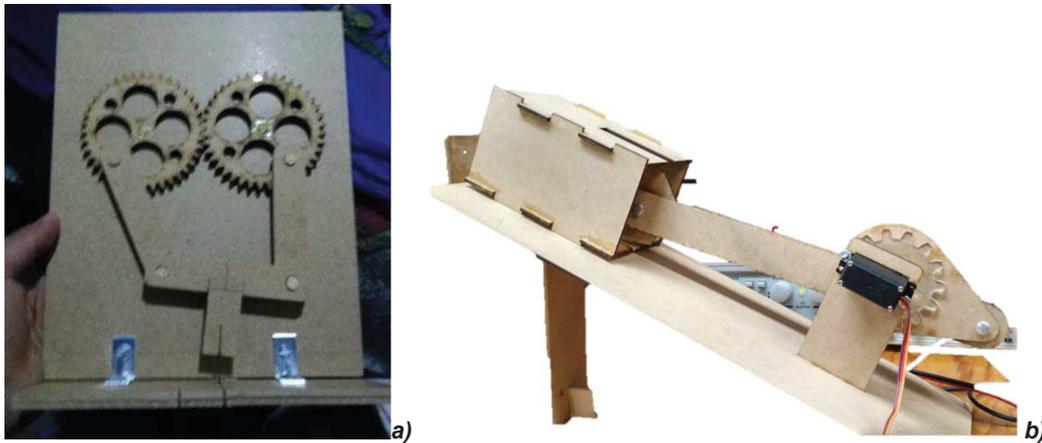


Figura 3. En la fotografía a) se muestra el mecanismo para cortar con una sierra y en la b) un mecanismo para compactar envases de plástico.

Práctica 3. Levas. En esta práctica se solicitó que buscaran una aplicación para las levas y que entregaran las gráficas de movimiento, velocidad y aceleración que hubiesen diseñado. En el ejemplo mostrado en la Figura 4, se muestra una tenaza acoplada a una leva que abre y cierra la pinza. Los materiales varían, pero la constante es usar piezas de MDF, acrílico y la técnica de corte laser.

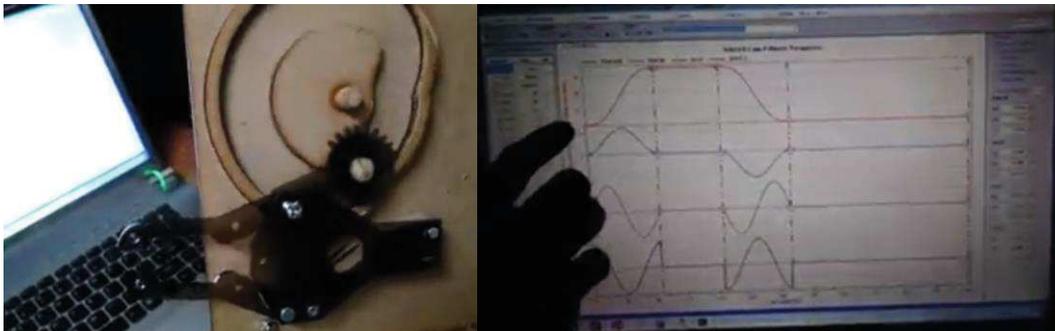


Figura 4. Capturas del video del reporte de la aplicación de la leva acoplada a una tenaza y sus gráficas

Práctica 4. Transmisión de movimiento. Para esta práctica se solicitó que armaran un mecanismo capaz de transmitir movimiento a una llanta de una bicicleta, triciclo o carro. En la Figura 5 se muestra una cadena que conecta a dos ejes acoplados a engranes. No fue requerido un actuador, pero algunos equipos hicieron ensayos. Una vez más, se usaron piezas de MDF, acrílico y la técnica de corte laser, pero en la Figura 5, se observa que un equipo usó piezas recicladas, metal y una cadena.



Figura 5. Ejemplo de transmisión de movimiento por cadena dentada y engranes.



Práctica 5. Medición de velocidad. Se solicitó leer la velocidad de un motor de corriente directa con ayuda de un optoacoplador mostrado en la Figura 7a, de tal forma que se despliegue el resultado en algún tipo de interfaz. En esa misma Figura 7b se observa que el alumno acopló un optoacoplador a una rueda de acrílico con aperturas en la periferia cada 24 grados, la cual se movía con un motorreductor simple de 5V de corriente directa. Se puede observar una pantalla de cristal líquido que muestra la velocidad.

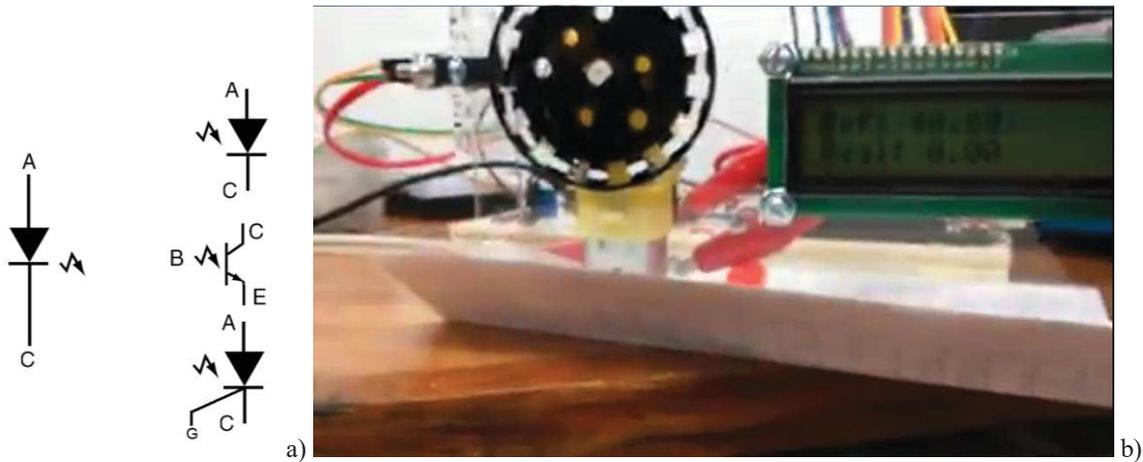


Figura 6. a) Optoacoplador formado por un emisor de luz y algún dispositivo semiconductor sensible a la luz. b) ejemplo de sistema desarrollado en por un alumno.

Práctica 6. Medición de posición. En esta práctica se pidió buscar soluciones electrónicas para la medición de una posición angular de un motor de corriente directa y de la misma forma, desplegar el resultado. Por un lado, se puede emplear un potenciómetro acoplado al eje del motor que se puede configurar como divisor de voltaje y con ayuda de un convertidor analógico digital, mostrar el resultado en binario. Por otro lado, se puede usar otro sensor digital conocido como encoder de cuadratura y decodificar la señal para convertirla en ángulo. En el mercado existen múltiples opciones para este tipo de encoder, o bien se pueden implementar con dos optoacopladores, mencionados en la práctica anterior. El equipo que estuvo trabajando con la construcción de una bicicleta de prácticas anteriores (Figura 7a) usó un sensor de rotación o *rotary encoder*, que es en esencia un encoder de cuadratura y se observa en la Figura 7b.

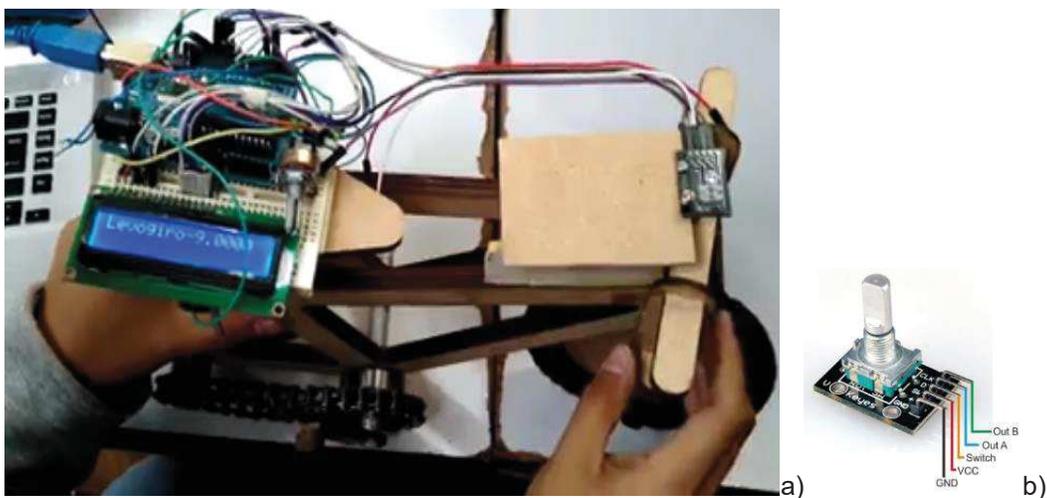


Figura 7. a) Manubrio de “bicicleta” instrumentado con un encoder de cuadratura, b) *rotary encoder*.

Práctica 7. Medición de corriente. En el caso de esta práctica se solicitó algo muy similar a las dos anteriores, adquirir la señal de corriente y trasmitirla a una interfaz de usuario. En algunos casos usaron

la ley de Ohm y con una resistencia se convertía la señal de corriente a voltaje y se hacía la lectura con un microcontrolador, por otro lado, está el uso de amplificadores operacionales (Figura 8a) y también están los sensores comerciales como el mostrado en la Figura 8b.

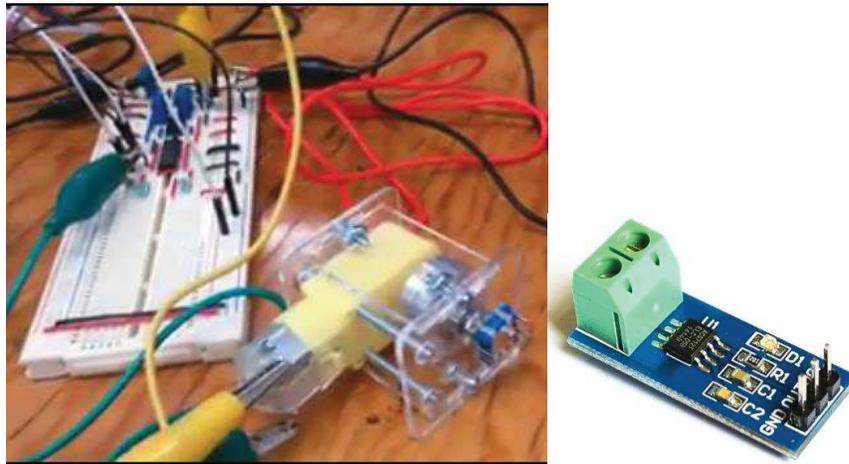


Figura 8. a) Ejemplo de la instrumentación de corriente con Amplificadores operacionales y b) Sensor comercial de corriente especial para Arduino.

Práctica 8. Medición de variable física ambiental. Para esta práctica en particular se solicitó que no se usaran microcontroladores. La propuesta del profesor fue usar un sensor de temperatura LM35 y hacer el acondicionamiento con amplificadores operacionales y dar una referencia de temperatura a partir de la cual se tomaría la decisión de prender o apagar una lámpara y un ventilador. Este ejemplo se propuso como un miniproyecto donde tendrían que combinar su electrónica con la fabricación de un espacio cerrado en el cual se tenía que automatizar la regulación de la temperatura. En la Figura 9 se ve una propuesta de un equipo que usó un ventilador y unos focos de corriente directa. En la Figura 10 se esquematiza una simulación generada en Proteus® donde se amplifica la salida del sensor LM35 de temperatura y se compara con una referencia, además de la etapa de potencia que funciona con un relevador electromecánico, junto con un motor (teóricamente del ventilador) y una lámpara.

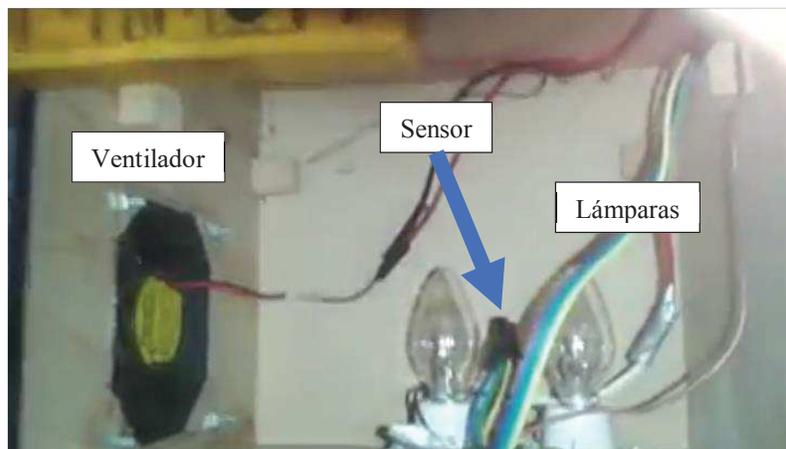
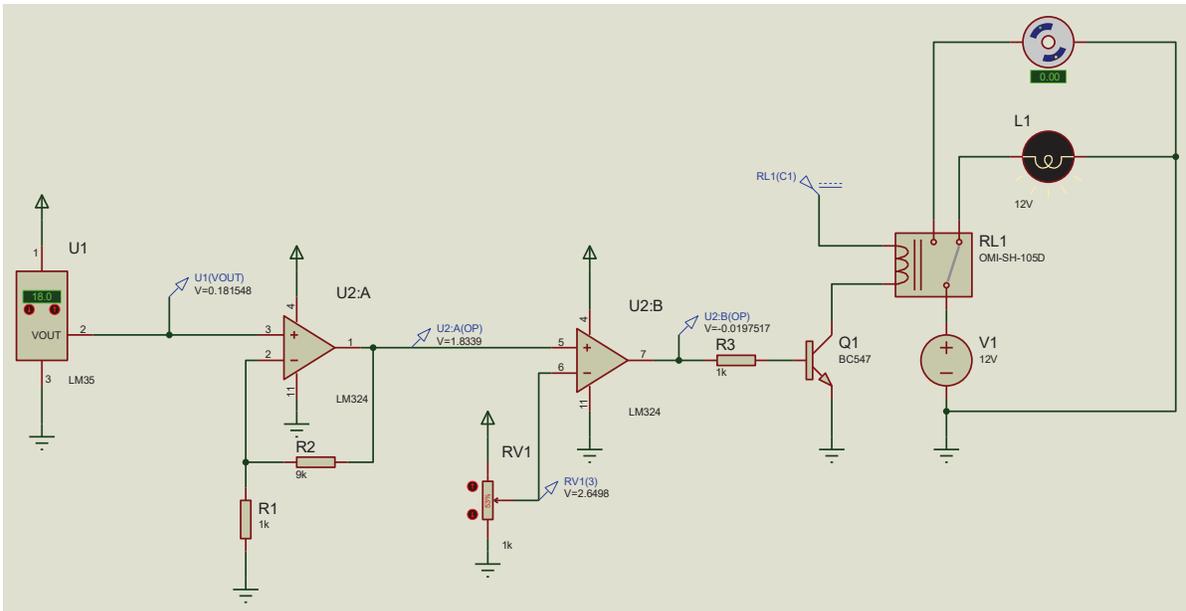
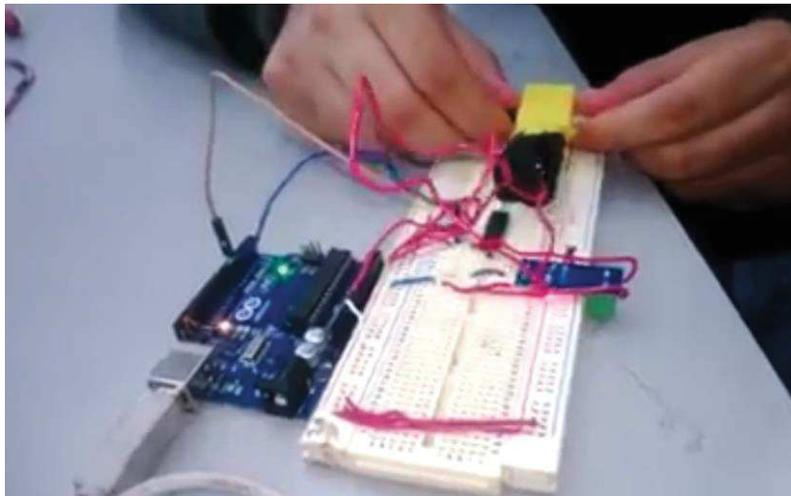


Figura 9. Propuesta del espacio para controlar la temperatura.



**Figura 10. Circuito de amplificación de la señal del sensor, de comparación y la etapa de potencia (relevador) para los actuadores.**

Práctica 9. Control por corriente. En las últimas cuatro prácticas incluyendo ésta, los alumnos están aplicando algoritmos de control programados en algún microprocesador de su preferencia. Reconociendo que la plataforma más popular es el Arduino [13], cuyas facilidades incluye una comunicación directa con la computadora a través de un puerto serial y que existe amplia información, así como múltiples ejemplos desarrollados por la comunidad alrededor del mundo. En la práctica 9 se solicita que, además de medir la corriente, se detecten cambios de la misma con ayuda de una referencia. La referencia es propuesta por el usuario y está en relación directa con un pico de corriente del actuador elegido (en este caso, un motor de corriente directa). Cuando se sobrepase esta referencia, el algoritmo desactivará al actuador hasta nueva instrucción de inicio. Las aplicaciones son múltiples (por ejemplo, las ventanillas de los autos), y se pide a los alumnos que busquen su propia aplicación. En la Figura 11 se muestra un sistema de detección de cambio de corriente y el motor se detiene cuando el usuario sostiene en el eje del motor. En este caso particular, se deja pasar un tiempo y se reinicia la actividad del motor.



**Figura 11. Ejemplo de sistema de control por corriente.**

Práctica 10. Control de velocidad. En esta actividad se pide que retomen los circuitos generados en la práctica de lectura de velocidad y se le agregue el algoritmo de control que debe funcionar de la

siguiente forma: 1) se arranca el motor, se verifica que avance a la velocidad deseada o de referencia, 2) se aumenta la señal de voltaje de alimentación del motor o se disminuye si la velocidad está por debajo de la referencia o si está por encima de ella, respectivamente; 3) en caso de una perturbación (por ejemplo, que se sostenga el eje del motor), el voltaje de control debe aumentar o disminuir para conservar la misma velocidad deseada y de esta forma mantenerla constante. En la Figura 12 se aprecia un sistema con el motor y los potenciómetros que sirven para darle una referencia manual de la velocidad deseada.

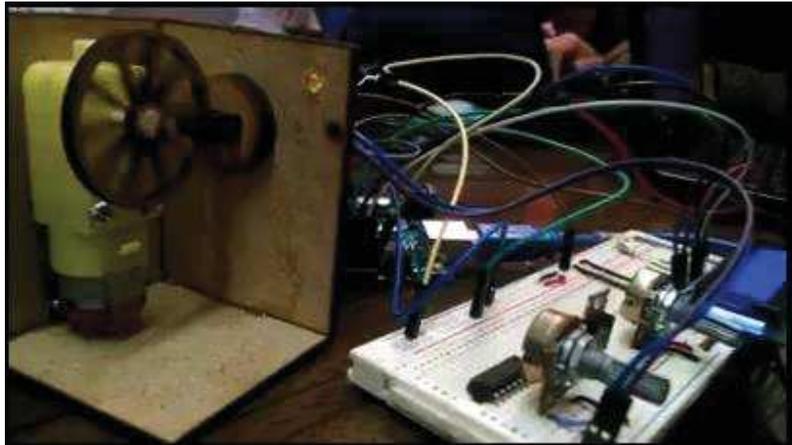


Figura 12. Ejemplo de sistema de control de velocidad.

Práctica 11. Control de posición. De forma muy similar, esta práctica retoma la instrumentación de posición, de tal forma que se tiene una referencia de posición angular a la que se desea llevar al eje del motor. En la Figura 13 se tiene un motor con un potenciómetro acoplado al eje para determinar la posición angular y otro potenciómetro para dar una referencia manual del ángulo deseado.

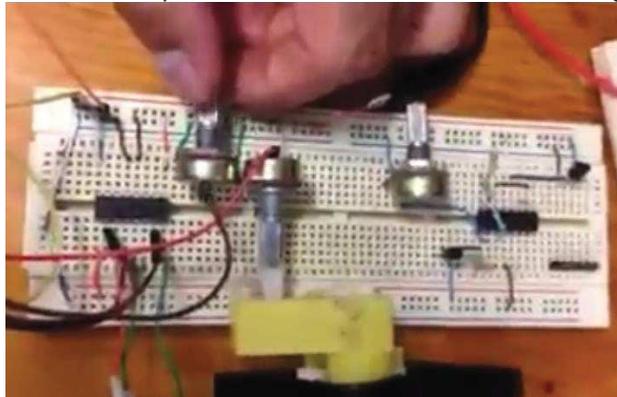


Figura 13. Ejemplo de sistema de control de posición

Práctica 12. Comunicación maestro-esclavo. En el objetivo de esta práctica, se ha propuesto que deben retomar las últimas dos prácticas y generar una comunicación entre dos dispositivos de tal forma que en el Maestro se generen las referencias y que sean transmitidos los valores hacia el dispositivo esclavo, quien ejecutará las acciones de control y llevar al valor deseado, ya sea de posición y de velocidad. En la Figura 14 y Figura 15 se observan dos diferentes ejemplos. En el primero, se tiene una interfaz de usuario realizada con *LabVIEW* de *National Instruments* [14], donde se despliegan velocidad y posición, además de los controles gráficos (perillas virtuales) que controlan ambas variables. En el segundo caso, se tiene un dispositivo móvil que envía las instrucciones inalámbricamente usando tecnología *Bluetooth*.

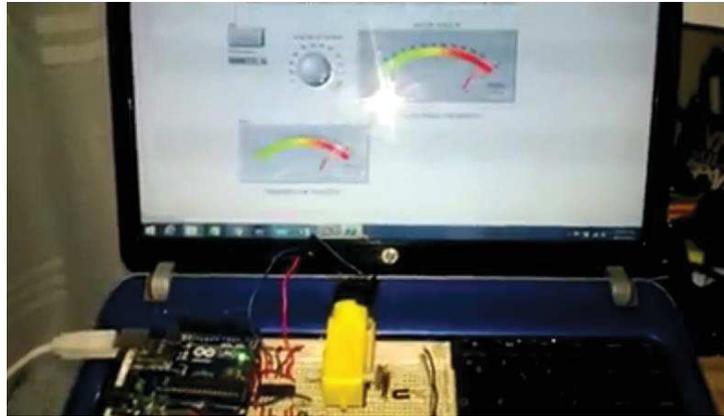


Figura 14. Sistema de control con Interfaz en LabVIEW.

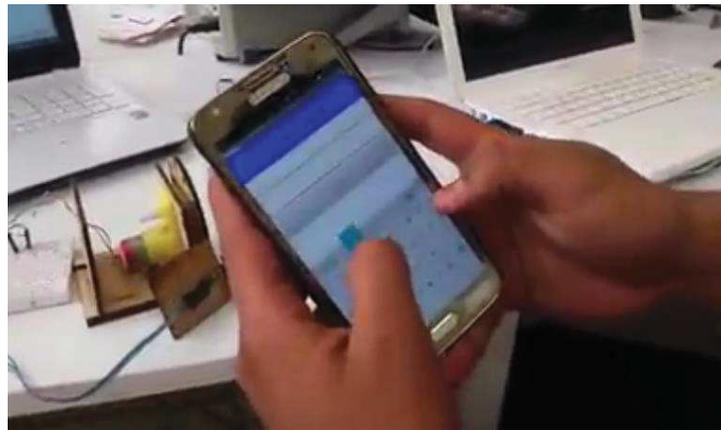


Figura 15. Sistema de control con Interfaz en dispositivo móvil

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se han propuesto doce prácticas que se dividen en tres secciones: a) cuatro prácticas orientadas a los subsistemas mecánicos de sostén y transmisión de movimiento, b) cuatro sistemas electrónicos de instrumentación como medición y acondicionamiento de señal, y finalmente c) cuatro que incluyen algún tipo de instrumentación, pero con algoritmos de control y supervisión, como control de posición por *encoder* de cuadratura, comunicaciones inalámbricas, etc.

Actualmente existen suficientes opciones técnicas y comerciales para cada práctica y las aplicaciones también son incontables. Por lo que estas prácticas pueden cumplir el objetivo de la asignatura de enseñar a los alumnos de ingeniería mecatrónica, y afines, a diseñar máquinas o productos.

Con este trabajo se puede homogenizar las prácticas que son llevadas a cabo en el laboratorio de la asignatura. Un aspecto de interés entre profesores es la estandarizar de las prácticas, de tal forma que se pueda validar un manual y como consecuencia se puede llegar a obtener una certificación del laboratorio. Esto último tiene repercusiones importantes como es la obtención de recursos y reconocimiento de instituciones externas, e incluso internacionales.

La asignatura debe llevarse con clases teóricas sobre los diferentes subsistemas, a manera de repaso y además de proveer al alumno de “filosofía” del diseño para mejorar tanto su pensamiento creativo como el metodológico.



Cabe aclarar que se ha llevado a cabo la propuesta en condiciones aisladas, sin embargo, la forma de validar si este manual de prácticas fortalece el conocimiento del ingeniero mecatrónico debe realizarse con al menos dos grupos: uno piloto (al que se le apliquen las prácticas) y un segundo grupo de control (al que NO se le apliquen las prácticas). Dichas características del estudio deben plantearse a nivel de cuerpos colegiados, jefaturas o institución y realizar un estudio estadístico que compruebe si hay una mejora o no. Al término del curso, los alumnos participantes, que desarrollaron las prácticas, obtuvieron calificaciones altas (esto es, entre 9 y 10), sin embargo, no se sabe si las prácticas mejoraron su desempeño o si lo alumnos *per se* son de alto rendimiento. De esta manera, se pensará en que, para validar la eficiencia de estas prácticas, también deberá estudiarse a la población previamente.

Una finalidad importante de los autores de este trabajo es compartir la experiencia para que otras instituciones o grupos de profesores interesados puedan usar estas prácticas de laboratorio y que puedan llegar a sus propias conclusiones.

## Agradecimientos

Se agradece a la Facultad de Estudios Superiores Aragón de la Universidad Nacional Autónoma de México durante la realización de este trabajo. Así mismo se reconoce el esfuerzo y dedicación de los alumnos que colaboraron en la realización de las prácticas, a todos ellos muchas gracias.

## Referencias

- [1] Bolton, W. Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en ingeniería mecánica y eléctrica. Alfaomega, México, 5 ed., 2013.
- [2] Alciatore, D. Introducción a la mecatrónica y los sistemas de medición. McGraw Hill, México, 2008.
- [3] Ulrich, K. Diseño y desarrollo de productos. McGraw Hill, México, 5 ed., 2013.
- [4] Ottestad M., Hovland G., Persson S., Robbersmyr K., Pohl J. A Survey of Mechatronics Education in the Nordic and Baltic Countries. In Proc. of the 3rd Intl. Conf. on Mechatronic Systems and Materials (MSM 2007), 27-29 September, 2007, Kaunas, Lithuania.
- [5] Reyes, F. Cid, J. Vargas, E. Mecatrónica: Control y Automatización. Alfaomega, México, 2013.
- [6] Mijarez, R. Electrónica, Grupo Editorial Patria, 2014, México.
- [7] Musto, J; Lumkes J.; Carnell, W.. A freshmen programming course for mechanical engineers using mechatronics applications, p 5939-5948, ASEE 2004 Annual Conference and Exposition, "Engineering Education Researchs New Heights", Salt Lake City, UT, United states, 2004
- [8] Voiculescu, L.; Liaw, B.. A novel labwork approach for teaching a mechatronics course, 2007 ASEE Annual Conference and Exposition, Honolulu, HI, United states, 2007
- [9] Ramirez-Cadena, M.; Vargas-Rodriguez, R.; Morales-Menendez, R.; Guedea, F.. Educational strategy based on active learning for mechatronics labs, v 17, n 1, Proceedings of the 17th World Congress, International Federation of Automatic Control, IFAC, Seoul, Korea, 2008
- [10] Solis, J.; Nakadate, R.; Yamamoto, T.; Takanishi, A.. Introduction of mechatronics to undergraduate students based on robotic platforms for education purposes, , p 693-698, RO-MAN 2009 - 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive, Toyama, Japan, 2009
- [11] Rojko, A.; Hercog, D.; Jezernik, K.. E-training in mechatronics using innovative remote laboratory, v 82, n 3, p 508-516, 2011.
- [12] Patil, R.; Wagner, J.; Schweisinger, T.; Collins, R.; Gramopadhye, A.; Hanna, M.. A multi-disciplinary mechatronics course with assessment-integrating theory and application through laboratory activities, v 28, n 5, p 1141-1149, Current Trends in Nanotechnology Education, 2012
- [13] <https://www.arduino.cc/>
- [14] <http://www.ni.com/>



# Sonar programado en una Raspberry Pi para emplear en navegación de robots móviles

Mendoza-Hernandez Maria del Rayo<sup>1</sup>, Perez-Carrizal Miguel Alfonso<sup>1</sup>, Malagon-Soldara Salvador Manuel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México en Celaya

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Querétaro

## Resumen

*El presente trabajo contiene el diseño y programación de un sonar capaz de realizar el mapeo de objetos en una interfaz gráfica. El principio fundamental de este proyecto está basado en la localización acústica, ésta emplea impulsos sonoros para determinar la presencia de objetos dentro del ambiente. La programación del sonar está desarrollada en una Raspberry Pi, por medio del lenguaje Python y la interfaz gráfica Tkinter. El módulo acústico utilizado el HC-SR04, conectado a la GPIO (entradas y salidas de propósito general) de una Raspberry Pi. Como resultado, se obtuvo una gráfica circular que ayuda al monitoreo del ambiente, estimando las distancias hasta los objetos dentro del rango de trabajo de dos sensores HC-SR04. Dos de estos módulos forman el sonar, y le transfieren sus principales características: 400 cm de alcance máximo, 2 cm de alcance mínimo, y una resolución de 3 mm. Sin embargo, el sonar en conjunto tiene la ventaja de aumentar los 15° en el ángulo de medición de los módulos, en comparación a usarlos por separado. Esto ocurre gracias a la rotación de la plataforma que contiene a los módulos ultrasónicos. Por último, es importante destacar que las pruebas se hicieron dentro de un ambiente controlado, que simula un circuito cerrado de calles para una futura aplicación en la navegación de robots móviles.*

**Palabras clave:** SLAM, sonar, raspberry, python.

## 1. Introducción

A través de los años, el diseño de diversas tecnologías se ha centrado en facilitar la realización de las actividades cotidianas, y con esto, mejorar la calidad de vida de las personas. El avance de la tecnología ha ido creciendo a un nivel elevado en diversos ámbitos, tales como el industrial, el manufacturero, de transporte, entre otros. Donde uno de los avances más destacados en el transporte, es en cuanto a la robótica móvil, ésta comprende una línea de investigación que avanza a grandes pasos. Las aplicaciones son innumerables, y todas siempre en la búsqueda de resolver situaciones en las que el ser humano necesita de colaboración. Es por ello, que el enfoque de este proyecto está centrado en el avance de la tecnología en los medios de transporte o navegación [1].

Actualmente, se han quedado obsoletos muchos medios de transporte, desde los automóviles a carbón, barcos, hasta los trenes, que demoraban muchos días en viajar distancias grandes. Hoy en día existe una variedad de vehículos que permiten viajar las mismas distancias, pero con una velocidad mucho mayor [2]. Uno de los últimos avances en cuanto a tecnología aplicada en el transporte, es la creación de automóviles autónomos, los cuales son capaces de imitar las capacidades humanas de manejo y control. Estos automóviles son capaces de percibir el medio que los rodea mediante técnicas complejas como localización, visión computarizada y sistemas de posicionamiento. De esta manera el automóvil autónomo cuenta con sistemas avanzados de control que son capaces de interpretar información para identificar la ruta más apropiada, obstáculos y señalamientos de tránsito [3]. Una de las opciones más socorridas a la hora de intentar obtener información del ambiente, son las cámaras [4]. Sin embargo, este tipo de sensores provocan problemas como la necesidad de una gran capacidad de cómputo. Por otro lado, se encuentran los



sensores láser [5], estos sensores son muy precisos, pero tienen problemas en el correcto direccionamiento de su haz, debido a que el área de trabajo es demasiado puntualizada.

En [6] se realizó un modelo de sensor basado en tecnología estéreo al que se enmarcó en los denominados Sónares de Largo Alcance. El método consiste en reducir la información 3D obtenida por una cámara estereoscópica a un conjunto de lecturas coplanares con la misma naturaleza que un arco de sónares. Por tanto, este modelo se puede utilizar directamente sobre los algoritmos clásicos de navegación.

Todos estos dispositivos recolectan información para identificar objetos en el ambiente, donde uno de los factores más importantes, es localizar los obstáculos. Un sonar puede usarse como medio de localización acústica, la cual funciona por medio de impulsos sonoros para determinar la presencia de objetos. Para el desarrollo de este trabajo se construyó un sonar, se usaron sensores ultrasónicos montados en una base, y dicha base cuenta con un servomotor que permitirá el giro de acuerdo con la programación de su posición. Los sensores enviarán las distancias leídas a una *Raspberry Pi* y de esta manera realizarán el mapeo del ambiente. Además, mediante una conexión remota a una pantalla externa, es posible visualizar los objetos que se encuentren dentro del área en el que se desplace el coche autónomo. La gráfica circular que se obtuvo como resultado, se despliega dentro de una ventana del sistema operativo *Raspbian*. Dicha gráfica ayuda al monitoreo del ambiente, estimando las distancias hasta los objetos dentro del rango de trabajo de dos sensores HC-SR04. Dos de estos módulos forman el sonar, y le transfieren sus principales características: 400 cm de alcance máximo, 2 cm de alcance mínimo, y una resolución de 3 mm. Sin embargo, el sonar en conjunto tiene la ventaja de aumentar los 15° en el ángulo de medición de los módulos por separado. Esto ocurre gracias a la rotación de la plataforma que contiene a los módulos ultrasónicos. Mencionada rotación se hará por medio de un servomotor acoplado a la base de la PCB (del inglés: Printed Circuit Board) donde están soldados los sensores.

Para finalizar, cabe destacar que este proyecto se enfocó únicamente en el desarrollo y programación del sonar. Este nuevo sensor le permitirá al automóvil detectar objetos que pudieran obstruir su desplazamiento, por consiguiente, lo capacitará para realizar el mapeo de dichos objetos por medio de puntos en una interfaz gráfica. Es importante mencionar que el proyecto únicamente se enfocó en generar el mapeo de objetos en un ambiente controlado, y no a la toma de decisiones que debe ejecutar el automóvil, puesto que el sonar fue montado en un carro a control remoto.

## 2. Metodología

La herramienta que hace todo el procesamiento de datos dentro del proyecto es la *Raspberry Pi 3* (ver figura 1). Ésta es una placa de cómputo individual (SBC, siglas en inglés) de bajo costo. Tiene como objetivo estimular la enseñanza de ciencias de la computación en las escuelas, y cuenta con las siguientes características: procesador a 1.2 GHz de 64 bits con cuatro núcleos ARMv8, 802.11n Wireless LAN, 4 puertos USB, 40 pines GPIO, núcleo de gráficos Video Core IV 3D, y una reducida dimensión en su placa, con apenas 8.5 por 5.3 cm. Además, la *Raspberry* cubre todos los aspectos básicos para programar en *Python*, tales como manejo del sistema mediante consola, aplicaciones con ventanas utilizando *Tkinter* y animaciones con *Scratch*.

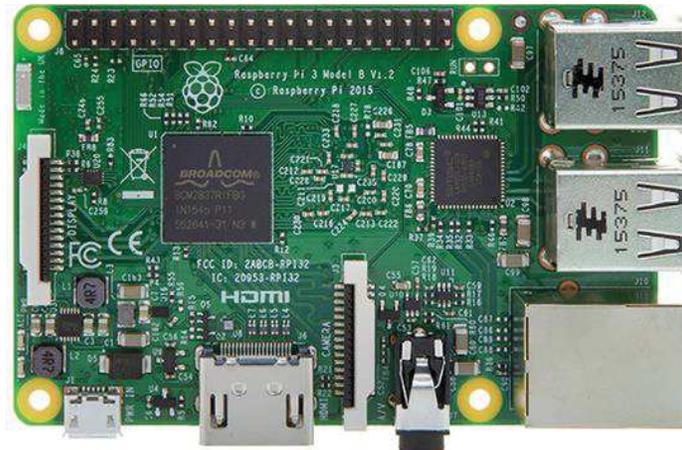


Figura 1. Raspberry Pi 3

Como primer paso para detectar distancias, en este proyecto se realizó un circuito eléctrico, el cual consistió en dos sensores ultrasónicos HC-SR04. Estos sensores tienen un alcance de 2 a 400 *cm*, además de tener un uso sencillo. Cuentan con un transmisor (bocina) que emite una onda acústica hacia un objeto para ser reflejada y enviada a un receptor (micrófono, ver figura 2). De esta forma, es posible calcular la distancia que existe hasta el obstáculo más cercano, procesando el tiempo que tarda la onda en ir del emisor al receptor, y asociando este resultado con la constante de la velocidad del sonido. Para esta finalidad se usó la ecuación (1), mostrada a continuación.

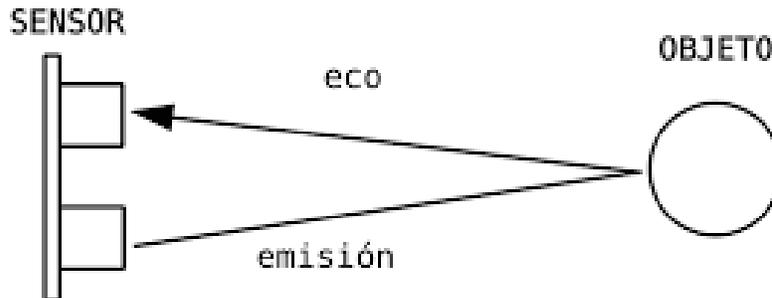


Figura 2. Disparo del HC-SR04.

$$D = \frac{T * V}{2} \quad (1)$$

donde:

T: es el tiempo que le toma a la onda ultrasónica el regresar.

D: es la distancia hasta el objeto.

V: es la velocidad del sonido, con 34300 *cm/s*.

### 2.1 Diagrama eléctrico del sonar

El HC-SR04 es un sensor que funciona con 5 V. Por otra parte, también la señal que envía a la *Raspberry Pi* será de 5 V. Sin embargo, la placa trabaja con 3.3 V. Por dicha razón se realizó un divisor de voltaje. Por tanto, es cuestión de ajustar los valores de R1 y R2, para que cuando  $V_{in}$  sea 5 V,  $V_{out}$  se aproxime a 3.3 V. En este caso se utilizaron resistencias de 1 k $\Omega$  y 2.2 k $\Omega$  (figura 3).

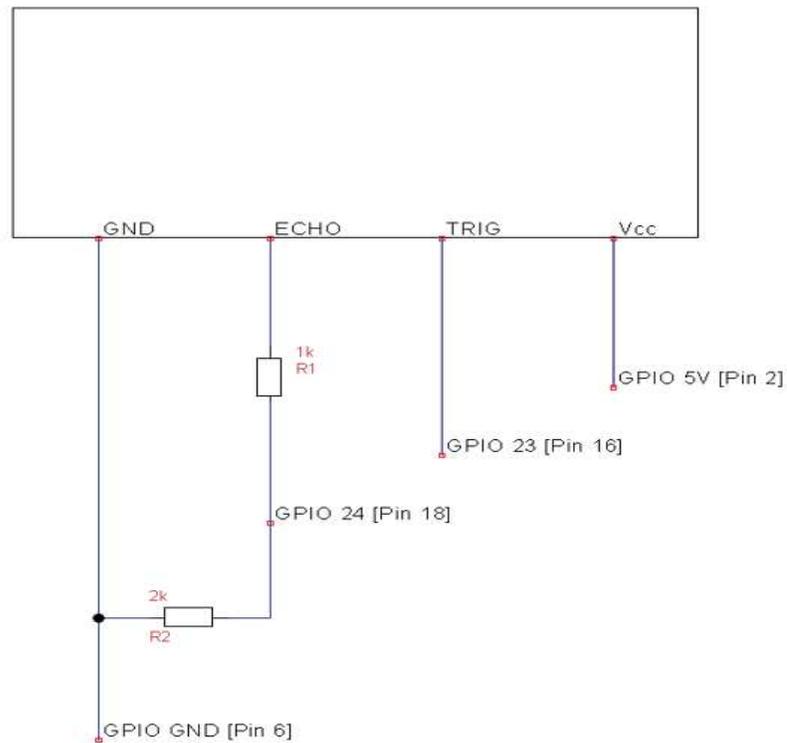


Figura 3. Diagrama eléctrico del sensor ultrasónico.

Una vez realizado el diagrama de un solo sensor y su programación mediante *Python*, se realizaron pruebas con obstáculos cercanos individualmente con los módulos. Esto con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del programa. Además, previamente se realizó un diagrama eléctrico haciendo uso de los dos sensores ultrasónicos utilizados en el sonar (figura 4), para así proceder a la conexión en la *Raspberry Pi*.

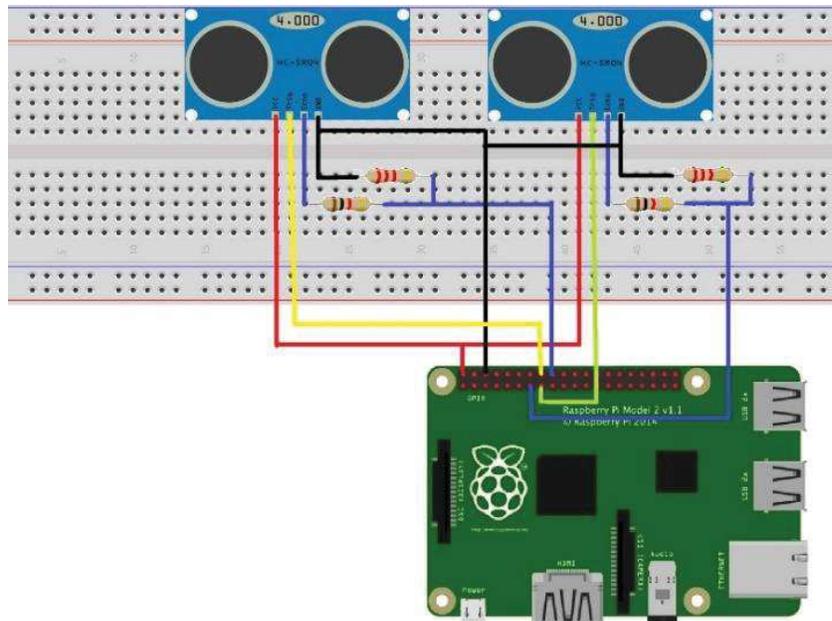


Figura 4. Diagrama eléctrico del sonar.



## 2.2 Construcción del sonar

La conexión eléctrica de los sensores se realizó en una placa rectangular PCB (figura 5). Se buscó que los sensores quedarán en las aristas opuestas, uno detrás de otro. Esta placa se perforó en el centro para así poder colocar un eje, su función será hacer girar a la placa con un servomotor. El servomotor utilizado es el ST47, con un giro es de 0 a 180°. No es necesario tener un giro de 360° debido a que la estructura tiene 2 sensores que cubren un total de 180+15°, resultando en una circunferencia completa.

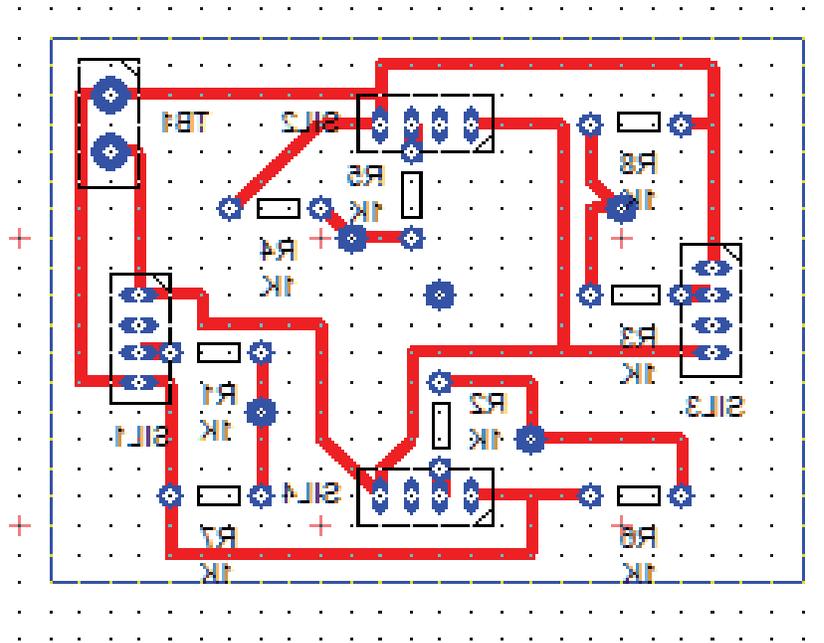


Figura 5. Placa PCB del sonar diseñada en Altium.

Para realizar la programación del control de giro se tomó en cuenta una señal PWM (modulador de ancho de pulso) de 50 Hz (figura 6). Con base en esto, se obtienen los ciclos de trabajo para los ángulos de 0°, 90° y 180° (ver Tabla 1).

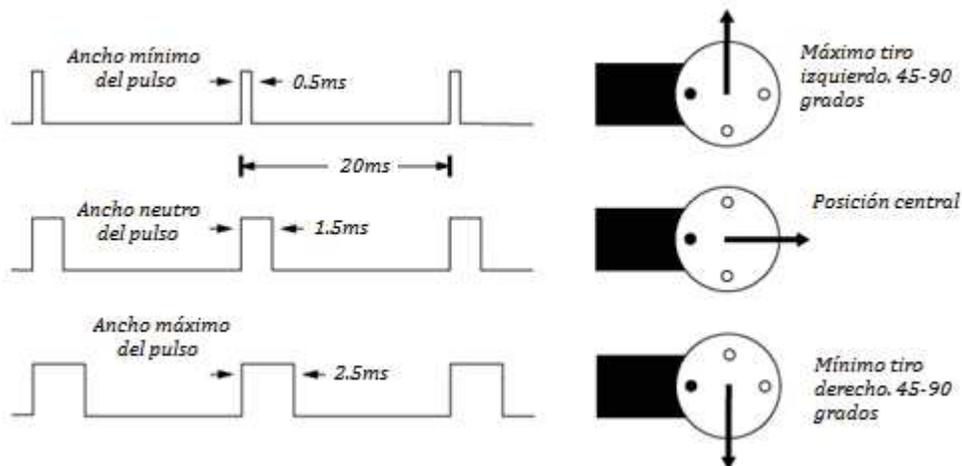


Figura 6. Señal PWM para control de giro.



Tabla 1. Ciclo de trabajo.

Posición	Ciclo de trabajo (sin unidades)
0°	2.5
90°	7.5
180°	12.5

Se requiere saber el ciclo de trabajo para cada ángulo, es por ello que mediante una interpolación se obtuvo la fórmula (2), dicha fórmula se utilizó dentro la programación explicada a continuación.

$$ct = \left( 2.5 + \left( \frac{i}{180} \right) * (12.5 - 2.5) \right) \quad (2)$$

### 2.3 Programación en interfaz en Python

Utilizando todos los principios anteriormente mencionados se realizó la programación para el cálculo de las distancias hasta los objetos. Asimismo, se generó la interfaz gráfica mediante el uso de la librería de *Tkinter* (figura 7). En esta interfaz se pudieron visualizar los objetos detectados en el sonar por medio de puntos.

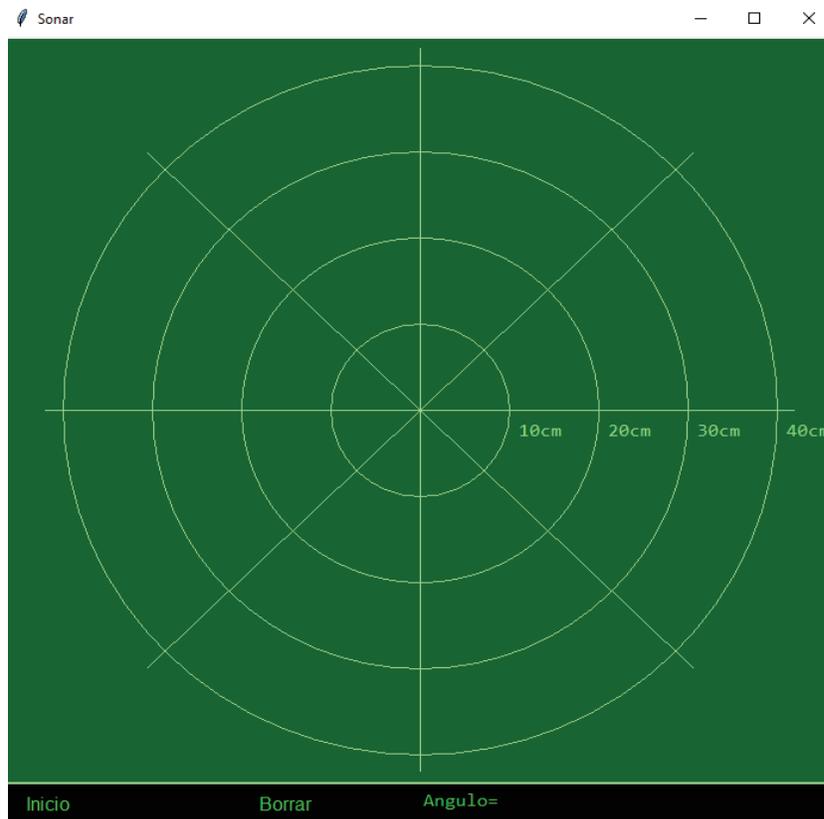


Figura 7. Interfaz gráfica realizada en la librería *Tkinter*.



Con base en la estimación de las mediciones de los sensores, la programación del servomotor y el diseño de la interfaz gráfica, se llevó a cabo la realización de un diagrama de flujo. Este diagrama nos permite visualizar la lógica que debe seguir el programa principal, para que el algoritmo pueda ejecutarse adecuadamente (figura 8).

Para comenzar con la programación, se hizo uso de algunas librerías para poder ejecutar las ecuaciones en *Python*, establecer la configuración de los pines *GPIO* de la *Raspeberry Pi*, para el envío y recepción de las señales de los ultrasónicos, seguido de varios comandos para la realización de la interfaz anteriormente descrita y el funcionamiento del servomotor. Posterior a esto, se configuraron los sensores ultrasónicos para poder realizar mediciones de distancia delimitada por un rango en grados los cuales estará girando el servomotor y un rango de distancia definida por la maqueta de pruebas. Como primera instancia se creó la función general en la cual se dibujaba por *default* la interfaz gráfica y se da la opción *inicio* para entrar a la función principal. Esta función está construida de subfunciones que tienen como objetivo leer los datos obtenidos por los ultrasónicos y dibujar en la interfaz gráfica. La función principal cuenta con un *reset* el cual nos permite borrar lo dibujado por el sonar en cualquier punto. Como ya se mencionó anteriormente, el sonar debía lograr un giro de 180°, es por ello que se creó un contador el cual le permite al servomotor ir incrementado de grado en grado. Al ir incrementado los sensores van monitoreando el ambiente y ejecuta las subfunciones necesarias, las cuales determinan si el sonar va en sentido horario o anti horario. Si detectan un obstáculo, lo grafica en la interfaz, y mientras no se haya presionado ninguna tecla en el teclado de la computadora seguirá la ejecución del programa (figura 9). De lo contrario, el programa habrá finalizado hasta volver a presionar la tecla de inicio en la interfaz.

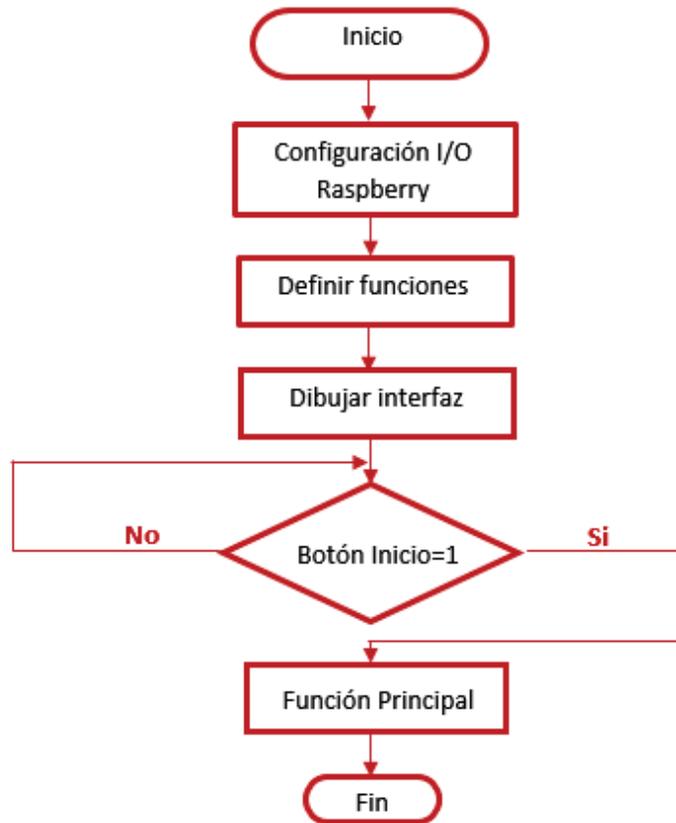


Figura 8. Diagrama de flujo acerca del programa en *Python*.

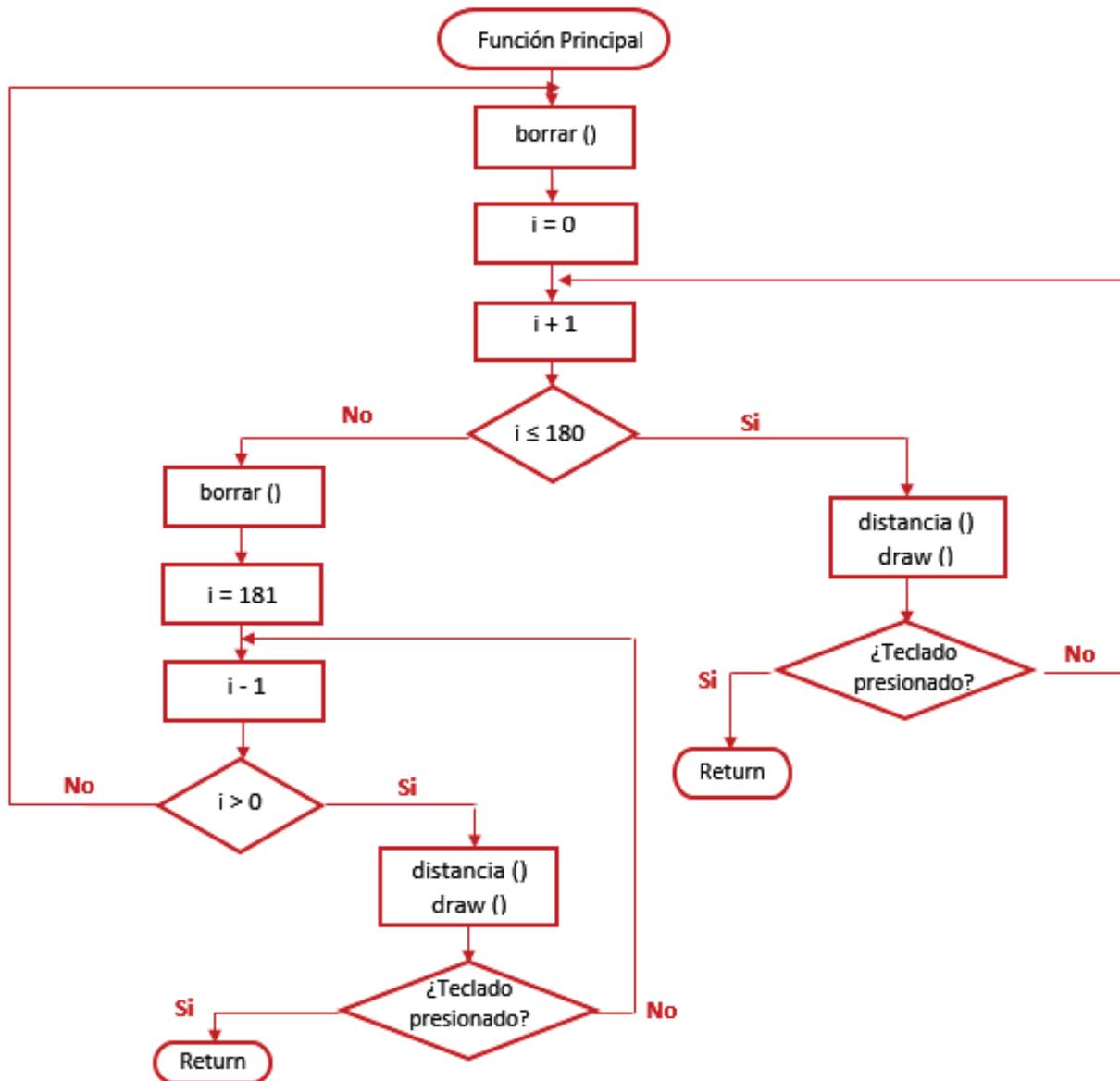


Figura 9. Diagrama de flujo acerca de la sub-función principal en *Python*.

#### 2.4 Construcción de la base del sonar

Se realizó el diseño de los planos del sonar con las dimensiones del mismo (ver figura10). Para esto se utilizó el programa CAD Autodesk Inventor, cuidando todos aquellos detalles de espacios que se requieren para poder adaptar los sensores ultrasónicos, el servomotor y el cableado.

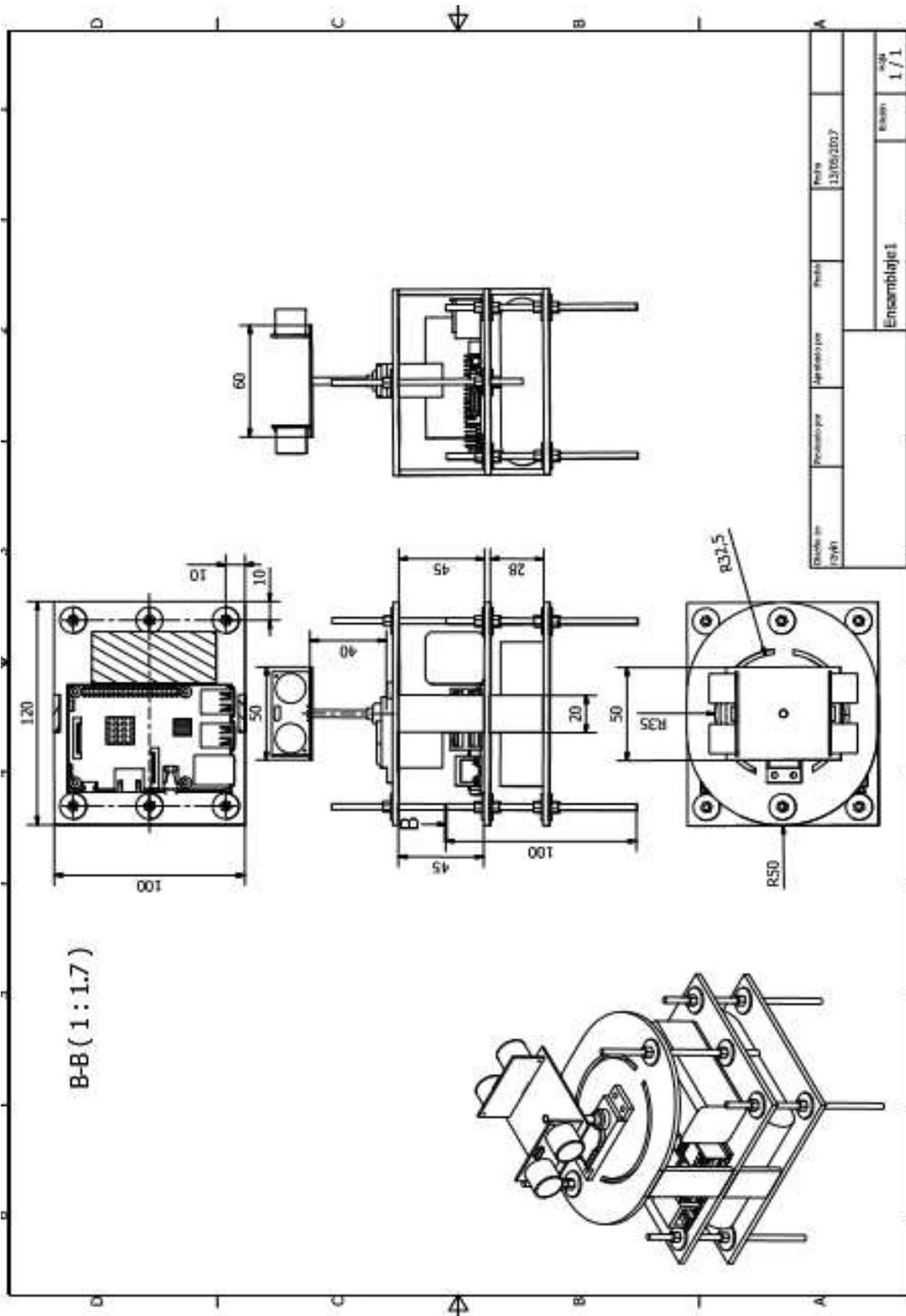


Figura 10. Planos del sonar dibujados en Autodesk Inventor.

Por último, se realizó un diseño en 3D para un posterior ensamble en proyectos subsecuentes (figura 11). Una de las principales ventajas al realizar este sonar es que se puede emplear en coches, barredoras, drones, orugas, por mencionar algunas aplicaciones.

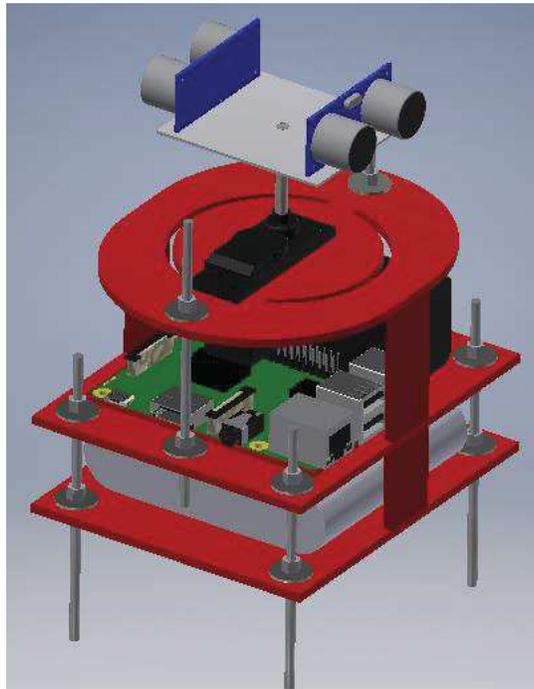


Figura 11. Base del sonar modelada en *Autodesk Inventor*.

### 3. Resultados

Posterior a todo el diseño y trabajo planteado anteriormente, se obtuvo una placa montada sobre el servomotor (figura 12), además de una estructura para montar el sonar sobre un carro a control remoto (figura 13). La placa fue capaz de girar gracias a los diferentes ciclos de trabajo programados en el motor que la sostenía. Sobre la placa fueron soldados dos módulos ultrasónicos para la detección de los objetos próximos. Mientras que las propiedades más importantes de estos sensores, como el rango de trabajo de detección y la resolución, fueron heredadas hacia la estructura del sonar (como fue mencionado anteriormente).

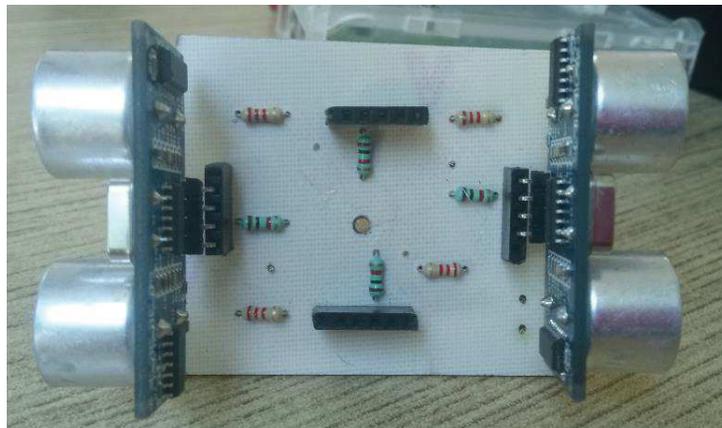


Figura 12. Placa PCB del sonar grabada por el método de planchado.

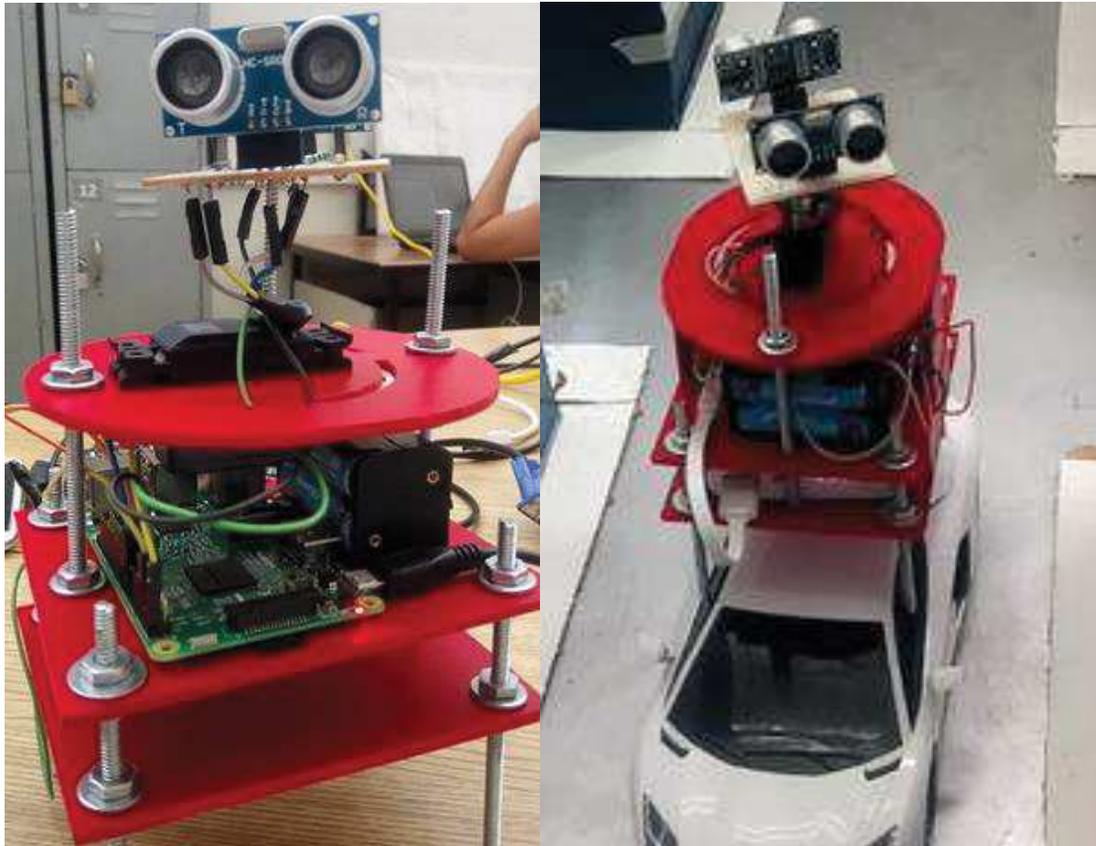


Figura 13. Estructura para albergar a la *Raspberry Pi*, al sonar y un módulo de baterías.

El carro a control remoto desplazó al sonar a lo largo de una calle dentro de la maqueta de pruebas (figura 14). Esta maqueta contenía un conjunto de edificios 5 cm más altos que el sonar. De esta manera, el ángulo de medición de los sensores era capaz de detectar su presencia.

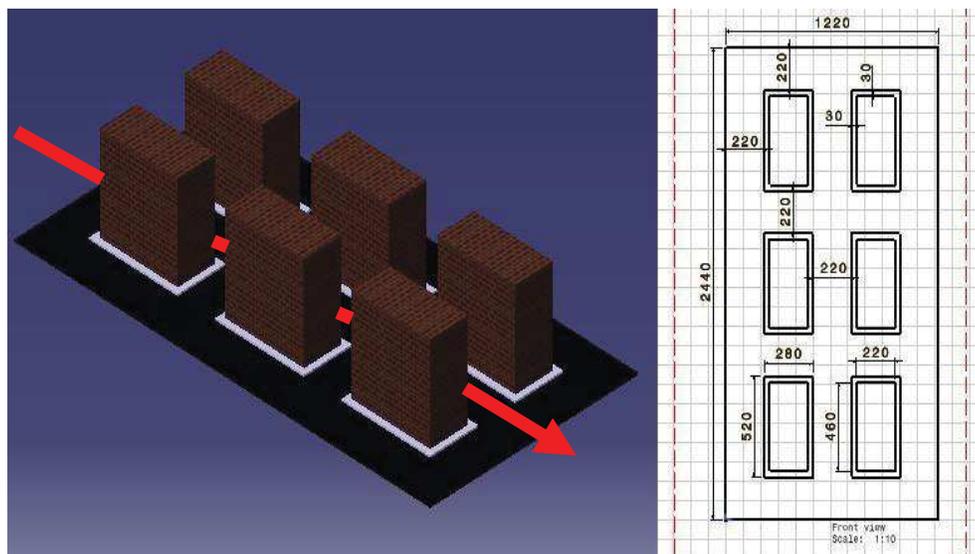


Figura 14. Diseño y medidas de la maqueta de pruebas.



La maqueta se construyó sobre la madera de un pizarrón de desecho, y para los edificios, se utilizaron cajas de cartón (figura 15). Éstas se cortaron a la altura y medidas necesarias para entrar al alcance de medición del sonar.



**Figura 15. Maqueta de pruebas para el traslado del sonar.**

Una vez terminada la maqueta se hizo pasar el carro a control remoto a lo largo del pasillo central. El auto ya contenía al sonar montado gracias a la estructura de acoplo. Para determinar cuándo un objeto se encuentra próximo al automóvil, se colocaron puntos de color verde. Como se puede apreciar en la figura 16, el sonar detecta los edificios, donde estos se encuentran normalmente a una distancia de 10 *cm*.

Debido al giro del motor, la posición ideal para las mediciones de los ultrasónicos es cuando se encuentran perpendiculares al edificio. Sin embargo, existen momentos en los que el sonar deja de mapear los edificios, lo que quiere decir dos cosas: que ha llegado a la intersección con la calle en la que se desplaza el automóvil, o que el sensor forma un ángulo mayor a  $15^\circ$  con la pared. Cada vez que el sonar se encuentra en marcha, el gráfico en *Tkinter* dibuja líneas hacia afuera de la circunferencia. Estas líneas representan la frecuencia de disparo de los sensores ultrasónicos. De esta manera, si encuentra un objeto, lo grafica sobre la línea dibujada. De no haber nada frente al sensor, sólo muestra la línea que indica que el sonar sigue en marcha.

El punto rojo generado en la interfaz que se muestra en la figura 16, representa una bandera indicando que el objeto detectado se encuentra muy próximo al automóvil (un rango de 2 a 5 *cm*). Para trabajos posteriores, se puede tomar esa bandera para hacer que el automóvil ejecute una acción para evadir objetos.

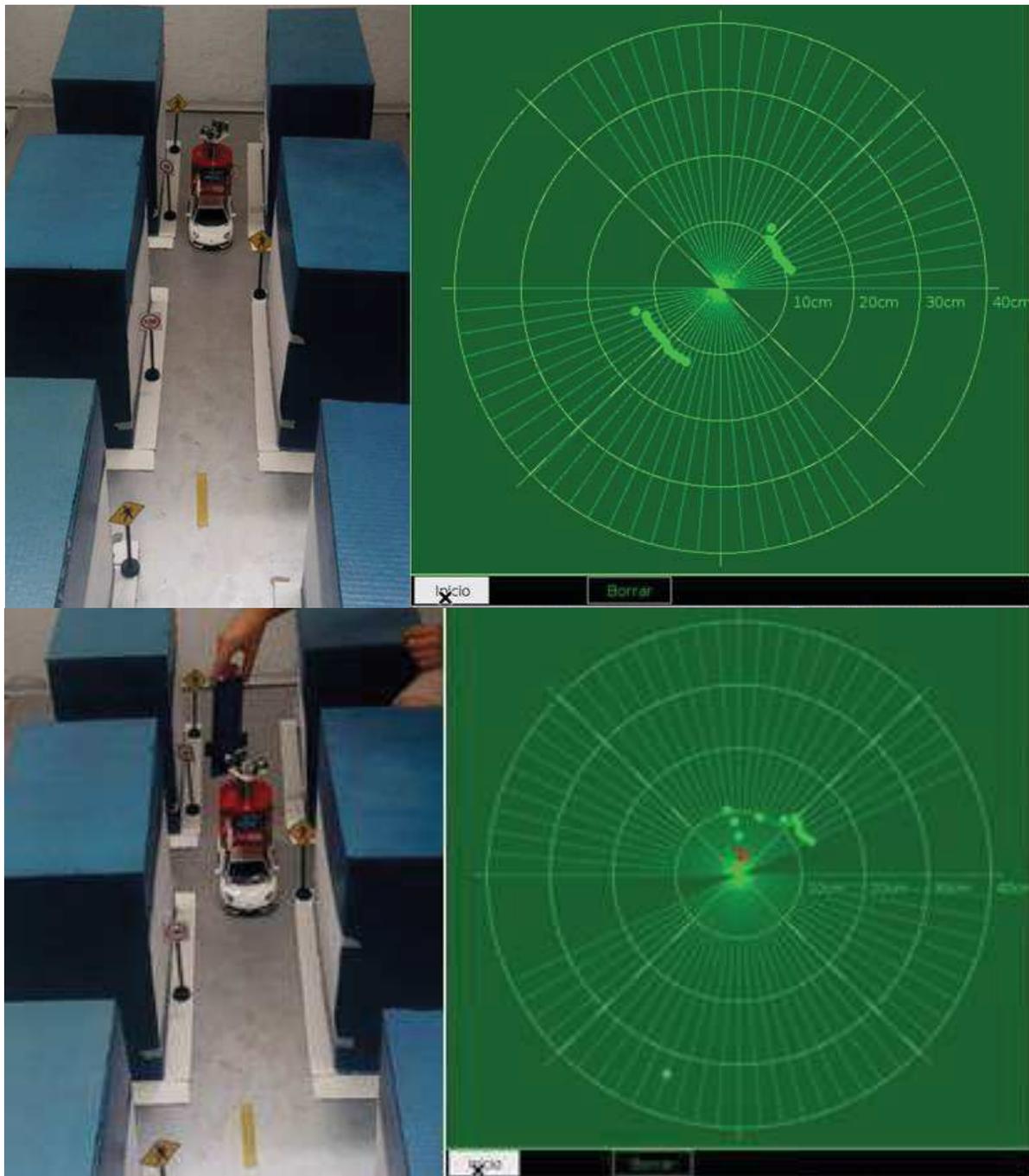


Figura 16. Detección de objetos en la periferia del sonar.

#### 4. Conclusiones

Este proyecto abarcó el diseño y la implementación del prototipo funcional de un sonar, que demostró ser capaz de detectar objetos a una distancia dentro de su rango de trabajo. Las mediciones dentro de este rango suelen ser demasiado precisas. Sin embargo, siempre que se trabaja con sensores ultrasónicos, se debe tomar en cuenta el posible surgimiento de alias. Dichos alias, representan señales emitidas por el primer sensor, y medidas por el segundo. Este tipo de fenómenos



es indeseable debido a que una vez disparada la señal, se comienza un contador y se para una vez recibida por el eco del mismo sensor. En el caso de ser emitida por uno y recibida por otro, resulta en una distancia sin importancia, sólo producto de un mal rebote del sonido en las paredes.

Para finalizar, como trabajo posterior, se desea tener una mejor interpretación de los datos obtenidos por el sonar, y así visualizar claramente el ambiente que rodea al automóvil. Es posible lograr esto reconstruyendo el ambiente basándose en la unión de los puntos graficados.

## Referencias

- [1] Malagon S., Toledano M., Zarazua G., Carrillo R. y Rivas E. "Mobile robot localization: a review of probabilistic map-based techniques", *International journal of robotics and automation*, Vol. 4, No. 1, p. 73-80, 2015.
- [2] Aparcana F. "Los avances tecnológicos en los medios de transporte", *Periodismo Informativo*, México, 2013.
- [3] Gómez M. "Coches eléctricos y autónomos, el cambio llega sobre ruedas", *Diario EL PAÍS*, España, 2017.
- [4] Manegatti E., Pretto A., Scarpa A. "Omnidirectional vision scan matching for robot localization in dynamic environments", *IEEE transactions on robotics*, Vol. 22, No 3, p. 523-535, 2006.
- [5] Gallegos G., et al. "Indoor SLAM based on composite sensor mixing laser scans and omnidirectional images", *IEEE conference in Robotics and automation*, p. 3519-3524. 2010.
- [6] Castillo M., Sáez J., "Modelo de sónar de largo alcance basado en tecnología estéreo", *Departamento de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial, Universidad de Alicante*.



# Análisis de objetos para el proceso de digitalización en técnicas perfilométricas

Moya Morales Juan Carlos<sup>1</sup>, Ramos Arreguin Carlos Alberto<sup>1</sup>, López Torres Claudia<sup>1</sup>,  
Pedraza Ortega Jesús Carlos<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro, México.

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, México.

## Resumen

*En el presente trabajo se muestra el análisis realizado a objetos que pueden ser sujetos a un proceso de digitalización 3D por técnicas perfilométricas. Se analizan dos características principales, en primer lugar, el material de la superficie del objeto, y en segundo lugar la morfología de los objetos clasificándolos en morfología simple, moderada y compleja, adicionalmente, se comparan diferentes tamaños de objetos con ambas características. Para validar los resultados del análisis, los objetos son procesados por un algoritmo de digitalización 3D basado en técnicas perfilométricas y la Transformada de Fourier Unidimensional (FTP1D), aplicando en el proceso dos algoritmos de desdoblamiento de fase; uno sencillo y otro robusto. Los resultados obtenidos indican que los objetos con características de una superficie opaca y con morfología moderada son los que obtienen una digitalización más precisa utilizando estas técnicas, sin importar el material de fabricación.*

**Palabras clave:** Digitalización de objetos, características de objetos, FTP, Perfilometría de Fourier.

## 1. Introducción

En las últimas décadas se ha realizado una gran cantidad de investigaciones enfocadas a resolver la problemática de digitalización de objetos; se han propuesto diversas estrategias, técnicas y metodologías, las cuales abordan desde diferentes puntos de vista la solución de almacenar la información 3D del objeto en la memoria de una computadora. Algunas soluciones propuestas son: El uso de sistemas electromecánicos denominados palpadores, donde su funcionamiento se basa en el uso de un dispositivo para tocar la superficie del objeto que se desea digitalizar. Los puntos tocados se almacenan en la computadora bajo un sistema de coordenadas, que al ser procesados generan el modelo 3D, tal como se menciona en [1], la desventaja de este sistema radica en que se requiere de una gran cantidad de puntos para poder digitalizarlo correctamente, por lo que el tiempo de digitalización es considerable. Los escaners 3D basados en Tiempo de Vuelo [2], donde, en este proceso un haz de luz es enviado desde una fuente y se mide el tiempo que tarda en ir y regresar, con el cual se determina la distancia del objeto en el punto tocado por el haz de luz. Las distancias son almacenadas para generar la representación 3D. Línea Laser, en este método la línea es proyectada y deformada por la superficie del objeto, generando un perfil que será analizado, para generar el modelo 3D. Este tipo de digitalizaciones posiciona al objeto en una plataforma giratoria, por lo que para la digitalización se necesita de un proceso de proyección y captura, el cual requiere alrededor de 36 proyecciones para que el objeto se rote 10° en cada proyección, adicionalmente se requiere de un proceso denominado ajuste de curvas tal como se menciona en [3], con el cual la superficie es almacenada en la memoria de la computadora. Existen otros métodos como los mencionados en [4-6] donde se utilizan línea laser para la digitalización o realizando ingeniería inversa mediante cortes sucesivos para lograr el objetivo. En el proceso de digitalización basado en proyección de franjas, se encuentra la técnica de cambio de fase, en la cual se proyectan 3, 4 o 5 patrones diferentes sobre un objeto con la intención de medir el



cambio que existe entre cada patrón proyectado, tal como se menciona en [4]; La Perfilometría por Transformada Wavelet (WTP) se basa en la proyección de un patrón único de franjas, el cual es analizado mediante la Transformada Wavelet [7]; así mismo, la Perfilometría por Transformada de Fourier (FTP) usa la Transformada de Fourier para el análisis de la escena con franjas deformadas [8], con una sola proyección, que permite recuperar la información de  $180^\circ$  del objeto a digitalizar. La FTP es uno de los métodos más importantes para la digitalización de objetos, desde su origen en los 80's, cuando Mitsuo Takeda lo propuso como una técnica para la medición de las crestas y valles en la deformación de una franja tal como se menciona en [9]. Por lo anterior este trabajo se enfoca al análisis de este método con el propósito de identificar los tipos de objetos que pueden ser sometidos al proceso de digitalización, debido a que estas características no se han clasificado, ni han sido reportadas en trabajos de investigación similares. Las siguientes secciones del artículo son: bases de la FTP, posteriormente se analizan las características de los objetos, se muestran los resultados y finalmente se presentan las conclusiones obtenidas.

## 2. Perfilometría por Transformada de Fourier 1D

La FTP fue propuesta en los 80's como ya se ha mencionado. En esencia el método consiste en la proyección de un patrón de franjas sinusoidal el cual, es deformado por la morfología del objeto a analizar, tal como se muestra en la figura 1, a la imagen obtenida por la deformación de las franjas, se le conoce como escena. Para poder obtener esta escena se suele utilizar la configuración de los ejes ópticos cruzados, tal como se observa en la figura 2. Debido a que la información 3D se obtendrá de la escena es necesario que la misma presente la menor cantidad de ruido posible. El objeto debe presentar características particulares para que las franjas puedan ser proyectadas y capturadas por una cámara, estas características se analizan más adelante.

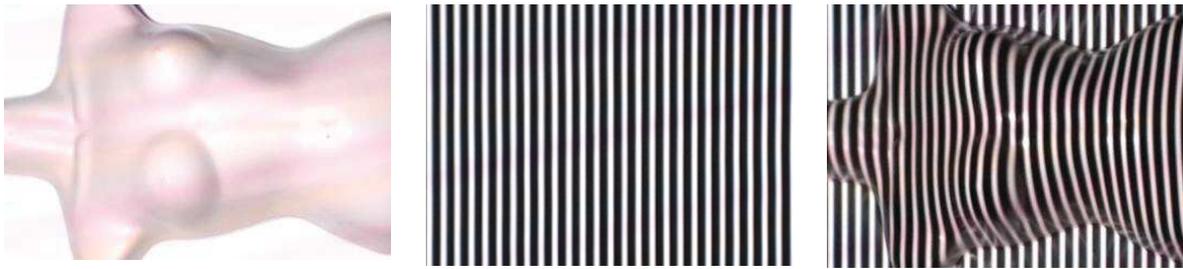


Figura 1. Proceso de proyección de franjas.

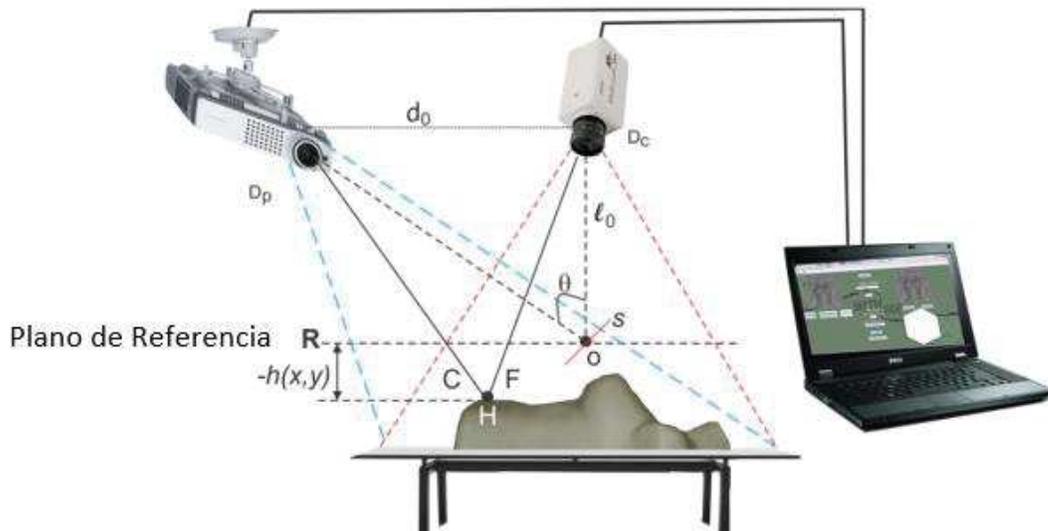


Figura 2. Configuración experimental



El plano que se genera en el punto **R** de la figura 2, es utilizado de referencia para medir la altura  $h(x, y)$  del objeto en particular, la lente de la cámara captura el plano del patrón generado por el proyector y deformado por la forma del objeto, que forma su imagen conjugada en el plano R. Cuando el objeto es uniforme, la altura expresado por  $h(x, y)$  es cero. La escena capturada por la cámara es expresada mediante la ecuación 1.

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) * \cos[2 * \pi f_0 x + \varphi(x, y)] \quad (1)$$

De la ecuación 1, se tiene que el valor  $g(x, y)$  corresponde al valor de intensidad en el punto  $(x, y)$ , la iluminación es identificada por  $a(x, y)$ , el contraste que se presenta entre las franjas de color blanco  $\varphi(x, y)$  y negro está indicado por  $b(x, y)$ , así mismo la frecuencia espacial está dada por  $f_0$  y representa la fase generada por la distorsión de las franjas. Al contar con la escena capturada es posible realizar la digitalización 3D utilizando la Transformada de Fourier (FT) unidimensional o bidimensional. En la Perfilometría por Transformada de Fourier unidimensional (FTP 1D), la escena capturada y representada por la ecuación 1, es representada mediante la forma compleja indicada en la ecuación 2.

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y)e^{(2\pi i f_0 x)} + c^*(x, y)e^{(-2\pi i f_0 x)} \quad (2)$$

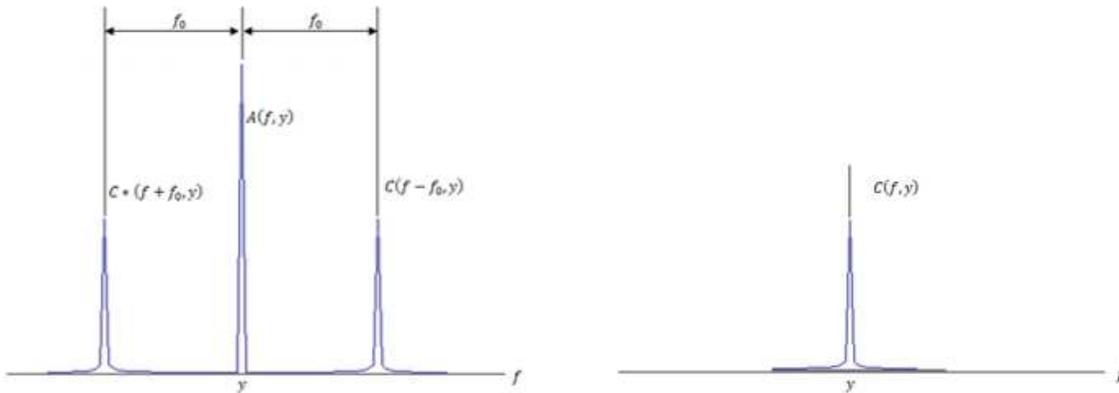
Donde,

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y)e^{[i\varphi(x, y)]} \quad (3)$$

De la ecuación 3 el  $*$  representa el complejo conjugado. Por lo que al aplicar la FT unidimensional se obtiene la ecuación 4.

$$G(f, y) = A(f, y) + C(f - f_0, y) + C^*(f + f_0, y) \quad (4)$$

En la ecuación 4, las letras mayúsculas representan al espectro espacial de Fourier y la frecuencia espacial en dirección del eje  $x$  es indicada por  $f$ , si se considera que las variaciones de  $a(x, y)$ ,  $b(x, y)$  y  $\varphi(x, y)$  son muy bajas en comparación con la frecuencia espacial  $f_0$ , es posible realizar un filtro en la  $f_0$  para eliminar todas las bajas frecuencias tal como se observa en la figura 3.



**Figura 3. frecuencia  $f_0$  filtrada .**

El proceso de filtrado, es muy importante dado que en la  $f_0$  se encuentra la información 3D, el considerar frecuencias cercanas a la  $f_0$  puede impactar en la adquisición de ruido no deseado, llevando a una digitalización incorrecta. Posterior al filtrado es necesario realizar la Inversa de la Transformada Rápida de Fourier (IFFT)  $c(f, y)$  con respecto de  $f_0$  con lo que se obtiene  $c(x, y)$ , definido en la ecuación 3; aplicando el logaritmo complejo se llega a la ecuación 5.



$$\log[c(x, y)] = \log\left[\left(\frac{1}{2}\right)b(x, y)\right] + i\varphi(x, y) \quad (5)$$

De la ecuación anterior y en la parte imaginaria se obtiene la fase  $\varphi(x, y)$ , los valores obtenidos quedan expresados en un rango de  $-\pi$  a  $\pi$ , a lo que se conoce como valores envueltos, por lo anterior se requiere aplicar un proceso denominado desdoblamiento de fase. La fase obtenida en la ecuación 5, se puede expresar de la siguiente forma:

$$\varphi(x, y) = \varphi_0(x, y) + \varphi_z(x, y) \quad (6)$$

Donde  $\varphi_0(x, y)$  es la fase que se produce por el ángulo de proyección correspondiente al plano de referencia (franjas uniformes), y  $\varphi_z(x, y)$  es generada por la altura del objeto en cuestión. Si se considera la equivalencia entre los triángulos  $\Delta PHC$  y  $\Delta PrHCr$  de la figura 2, se obtiene:

$$\frac{Pr Cr}{-h} = \frac{d}{L} \quad (7)$$

De tal forma que se obtendría,

$$\varphi_z(x, y) = \frac{h(x, y)2\pi f_0 d}{h(x, y) - L} \quad (8)$$

Despejando la altura  $h$  de la ecuación 8, tal como se muestra en la ecuación 9.

$$h(x, y) = \frac{L\varphi_z(x, y)}{\varphi_z(x, y) - 2\pi f_0 d} \quad (9)$$

Los valores obtenidos en  $h$  son considerados como la representación 3D del objeto. Este procedimiento permite obtener la información 3D de cada uno de los renglones de la escena de entrada, por lo que al final se deberá conjuntar cada uno de los resultados para visualizar un modelo 3D.

### 3. Análisis de Objetos

En el proceso de digitalización, los objetos son sometidos a la proyección de franjas que disciernen sobre ellos, por lo que las franjas se deforman por la morfología del propio objeto, pero el material de fabricación y acabado en la superficie puede provocar que los objetos no se digitalicen adecuadamente. Existen diferentes factores que provocan que las franjas no se deformen adecuadamente o al menos que el dispositivo de adquisición de la imagen no alcance a capturar la deformación con la suficiente precisión requerida, por ello, se ha analizado un par de características que afectan la digitalización de sólidos en técnicas perfilométricas. En primer lugar, se considera el material con el que los objetos son fabricados (principalmente el material de la superficie del objeto), como segunda característica se tiene la morfología de los objetos ya que impacta directamente en la deformación de las franjas que serán capturadas.

#### 3.1 Material de la superficie del objeto

Los objetos a digitalizar pueden estar fabricados de cualquier material en un estado sólido, pero aquellos que presentan una propiedad de reflexión provocan que las franjas no se deformen adecuadamente, al reflejarse el haz de luz la cámara no puede capturar las franjas deformadas. El brillo es un aspecto importante que surge con la proyección de las franjas, el foco del proyector genera una luz intensa que afecta la escena capturada, en esta categoría se encuentra a los espejos, objetos con superficie brillante, ya sea por un proceso de pulido o por la naturaleza del material con el que son fabricados.

Los objetos traslucidos tal como el cristal, no pueden ser digitalizados en su forma pura dado que la luz traspasa el objeto provocando que las franjas no se deformen y la cámara no podrá capturar la escena de franjas deformadas, en esta categoría se encuentran: los vasos, ventanas y cualquier objeto de cristal. Para resolver esta problemática existen materiales en polvo y aerosol que recubren la superficie haciendo que éstos pierdan la propiedad traslúcida, por lo que una vez que el material ha sido aplicado se proyecta el patrón de franjas y se prosigue con la digitalización. En la figura 4 se muestra

en a) una copa de cristal, y en b) un envase elaborado con plástico PET, estos objetos dejan pasar la luz y las franjas proyectadas sobre ellos no presentan la deformación necesaria tal como, se observa en la figura 4.



a) Copa de cristal; b) Botella de plástico.  
**Figura 4. Proyección de franjas en objetos traslúcidos.**

Los objetos con superficie opaca son apropiados para una digitalización correcta, dado que la superficie genera que las franjas puedan ser deformadas y visualizadas correctamente por el dispositivo de captura permitiendo una escena de franjas deformadas, tal como se observa en la figura 5. La mayoría de los objetos a digitalizar en este trabajo presentan esta característica, debido a que están fabricados en materiales como yeso o barro. Si los objetos poseen una superficie opaca y lisa, los objetos podrán digitalizarse utilizando algoritmos básicos. Los objetos de esta categoría son apropiados para una digitalización correcta, así mismo, si la textura del objeto no es lisa pero lo suficientemente marcada, las franjas podrán ser deformadas por el objeto y los algoritmos de digitalización procesarán la escena de manera correcta.



**Figura 5. Proyección de franjas en objetos opacos medianos.**

La dimensión de las figuras también es un factor, aunque no es determinante, dado que la tecnología puede ser cambiada para adaptarse a nuevos entornos, tales como, objetos muy pequeños o muy grandes, en la figura 6, se presenta una pieza denominada “oso”, la cual mide 4 cm. X 7 cm. x 1cm. de alto, lo que hace que las franjas se deformen pero no contiene la información 3D adecuada,

para este caso se deben acercar tanto el proyector, como la cámara para que la superficie del objeto pueda ser deformado por un mayor número de franjas. En los experimentos realizados se utilizó la configuración de la figura 2, con un altura  $l_0$  de 100 cm.



**Figura 6. Proyección de franjas en objetos opacos pequeños.**

### **3.2 Morfología de los objetos**

La morfología de los objetos es la información que al final de un proceso de digitalización 3D se obtendrá almacenado en la memoria de la computadora, esta morfología puede ser tan simple como un cubo o tan compleja como una serie de texturizados o rugosidades presentes en la superficie, por ello se clasifica la complejidad morfológica en 3 niveles: simple, moderada y compleja, en el primer nivel, se encuentran aquellos objetos que pueden derivar de figuras geométricas simples tales como: cubos, cilindros, etc., los cuales en la superficie estén libres de texturizados. El segundo nivel puede presentar formas complejas lisas o con algunas texturas bien definidas, marcadas y/o profundas, además de la separación de dichas texturas, que permiten la deformación de las franjas. En el último nivel, se encuentran los objetos que presentan rugosidades y texturizados finos, por lo que las franjas no se deformarán, o la deformación será casi imperceptible.

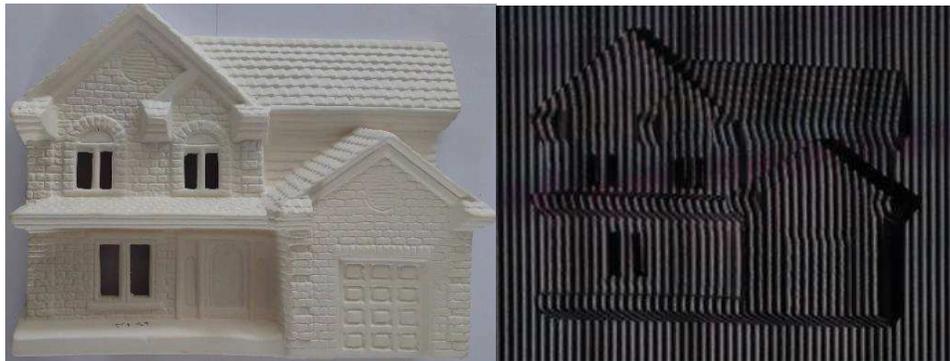
Si los objetos que se pretenden digitalizar presentan una morfología simple, pueden ser digitalizados utilizando algoritmos de desdoblamiento básicos, con lo que el tiempo de procesamiento, así como la cantidad de recursos consumidos por la computadora serán mínimos, en la mayoría de los casos sin la necesidad de requerir un post-procesamiento, pero es conveniente recordar que se debe considerar el número de franjas a proyectar sobre el objeto debido a que es un factor adicional a la forma del objeto.

En la figura 7, se presenta un objeto catalogado en el nivel de morfología moderada, dado que presenta texturas alrededor del rostro y algunas expresiones de la cara que permiten la deformación de la franjas, el objeto mide 25 cm. de diámetro con una altura de 7 cm., estas características permiten la deformación correcta de las franjas proyectadas sobre él.



**Figura 7. Proyección de franjas en objetos opacos con morfología moderada.**

Los objetos opacos excesivamente rugosos, pertenecen al nivel de morfología compleja, dado que la rugosidad de los materiales genera que las franjas se deformen de una manera no homogénea, por lo que es posible intentar la digitalización de este tipo de materiales, aunque el resultado no será el esperado si se desea digitalizar esta rugosidad. Objetos con superficie texturizada muy fina también entran en esta categoría. De esta forma, los objetos pueden ser digitalizados, sin embargo, dependiendo de la complejidad el uso algoritmos robustos puede ser requerido para su digitalización. Esto principalmente, en la etapa del desdoblamiento de fase y en el post-procesamiento. Un ejemplo de este tipo de objetos se presenta en la Figura 8, la cantidad de tejas que tiene la figura genera una deformación, pero no la suficiente para que se digitalice cada una de ellas.



**Figura 8. Proyección de franjas en objetos con morfología compleja.**

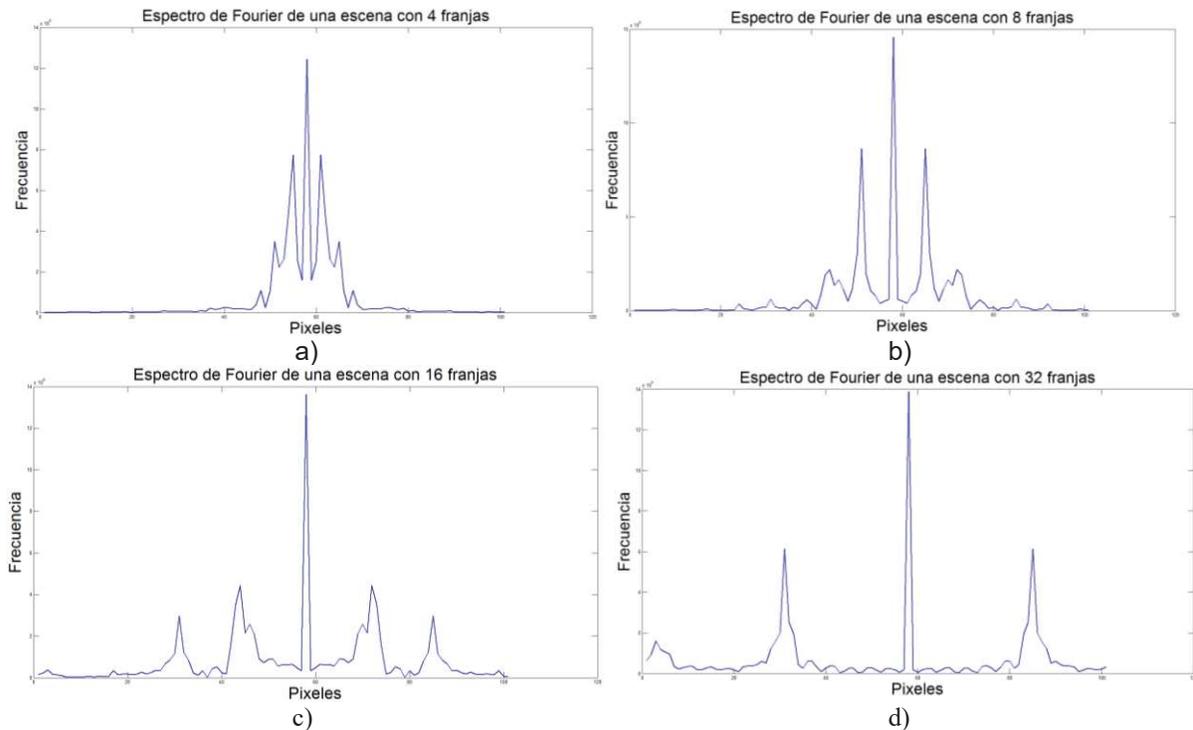
En la figura 9, se muestra el zoom realizado al objeto de la figura 8, donde el diseño presenta un texturizado y los ladrillos no deforman las franjas proyectadas, por lo que esta textura no podrá ser digitalizada, este mismo fenómeno sucede en objetos con un relieve o textura muy fina.



**Figura 9. Zoom de Proyección de franjas en objetos con morfología compleja.**



El número de franjas proyectadas y capturadas de la escena es un factor a considerar dentro del proceso de digitalización de objetos, debido a que este número de franjas es igual a la localización en píxeles de la frecuencia espacial o frecuencia fundamental  $f_0$ . En la figura 10, se muestran los espectros de amplitud de Fourier obtenidos en el centro de una imagen que contiene un objeto cuando se le han proyectado 4, 8, 16 y 32 franjas. Es importante notar que al centro de cada imagen se observa la componente de DC y los siguientes valores del pico máximo a ambos lados de esta componente son las frecuencias  $-f_0$  y  $f_0$  respectivamente. De forma equidistante, se tienen las frecuencias múltiplos de la frecuencia espacial, es decir  $-nf_0, \dots, -2f_0, -f_0$ , a la izquierda y  $f_0, 2f_0, 3f_0, \dots, nf_0$  a la derecha. Para poder obtener la información relacionada con la forma o altura del objeto es necesario llevar a cabo un filtrado en la frecuencia fundamental  $f_0$  exclusivamente. Como se puede observar en la figura 10 a), esta separación no es muy fácil, debido a que las componentes múltiplos están traslapadas con la frecuencia  $f_0$  proporcionando información innecesaria e imprecisa de la forma del objeto. En la figura 10 b), se muestra el espectro, pero con 8 franjas, de forma similar, la figura 10 c), muestra el espectro con 16 franjas y finalmente la figura 10 d), muestra el espectro con 32 franjas. Nótese que a medida que el número de franjas aumenta, la separación entre los múltiplos de la frecuencia  $f_0$  también se separan, permitiendo llevar a cabo una mejor extracción de la frecuencia fundamental y por consiguiente la información que se obtenga será únicamente la de la altura o forma del objeto, como lo muestra el método original [9].



**Figura 10. Espectro de Fourier de escenas con a) 4 franjas; b) 8 franjas; c) 16 franjas y d) 32 franjas**

## 4. Metodología

Acorde la figura 11 se tiene la metodología utilizada para el análisis realizado en este proyecto, donde como primera etapa se realiza la proyección de franjas sobre un objeto, las franjas son capturadas por una cámara y posteriormente la escena es analizada mediante la FTP1D, se verifica el

resultado y se analiza cualitativamente, observando los detalles de los objetos digitalizados con lo que se decide si la digitalización es considerada como aceptable o no.

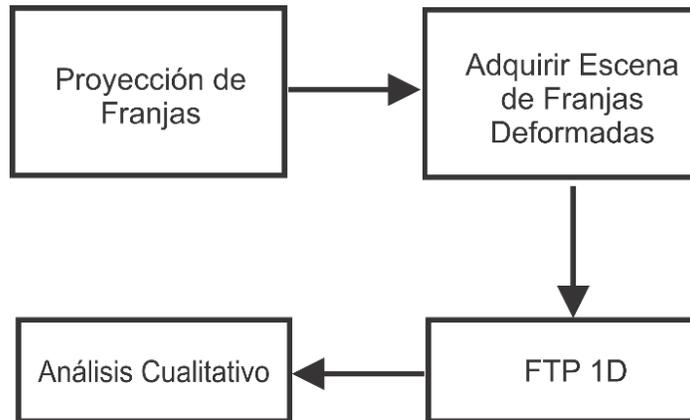


Figura 11. Metodología utilizada.

## 5. Resultados

Para validar el análisis, los objetos de las figuras 4 a), 6, 7 y 8, fueron sometidos al proceso de digitalización 3D utilizando la FTP1D, y la metodología propuesta, en todos los casos se aplicó un algoritmo de desdoblamiento de fase sencillo y otro robusto, para este segundo caso se utiliza el algoritmo denominado PUMA [10], al terminar el proceso los resultados se muestran en las siguientes figuras; en la figura 12 se observa la digitalización de un objeto traslúcido, donde a la izquierda se muestra el resultado utilizando el algoritmo de desdoblamiento de fase sencillo mostrando deformación en la altura, sin embargo, esto no corresponde con el objeto digitalizado, de igual forma con el algoritmo robusto tampoco se logra una digitalización adecuada, ya que solo se aprecian brincos en el contorno de lo que corresponde con el objeto sin ser claro de que objeto se trata. La figura 13, corresponde con la digitalización del objeto denominado “oso”, que como ya se mencionó, sus dimensiones son muy pequeñas y la digitalización no se logró de manera satisfactoria, acorde con lo que se ha comentado la cantidad de franjas que se deforman sobre el objeto son muy pocas para que la morfología del objeto se digitalice adecuadamente, aun así, se puede observar la digitalización con una elevación del objeto 3D, lo anterior, tanto con un desdoblamiento de fase sencillo como con el algoritmo robusto.

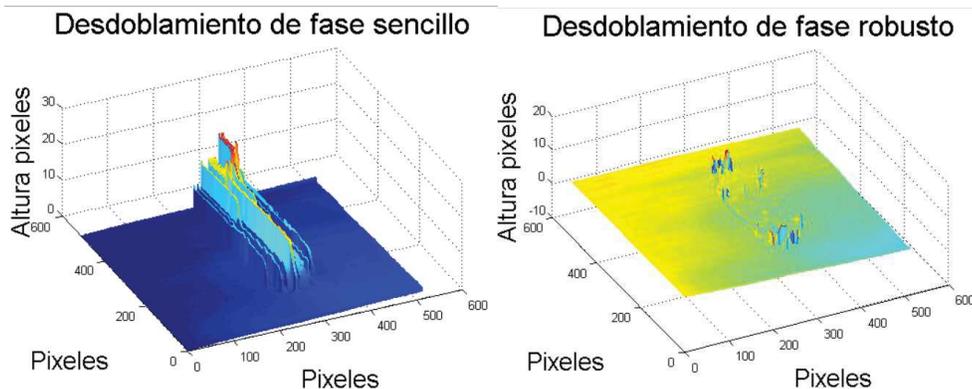
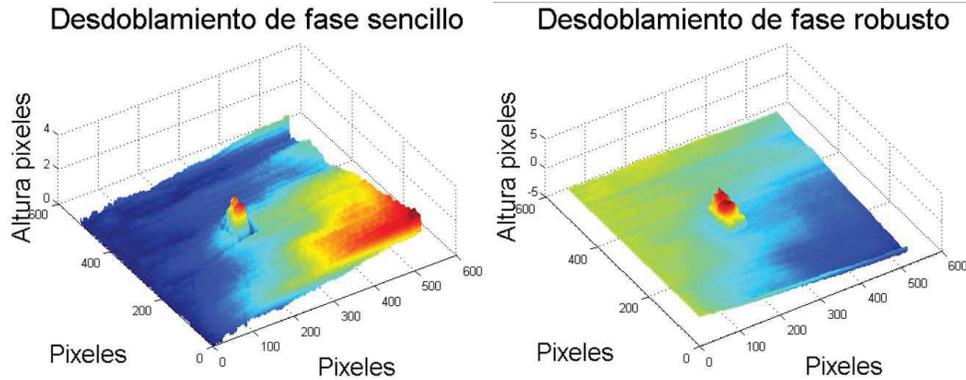
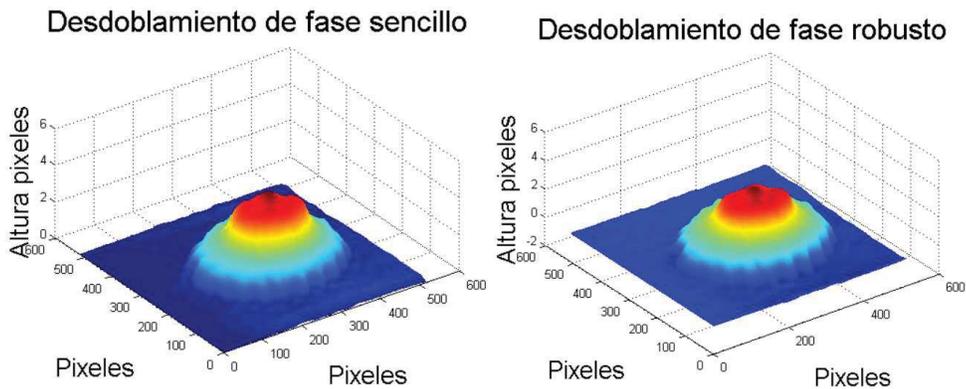


Figura 12. Resultado Objeto traslúcido.



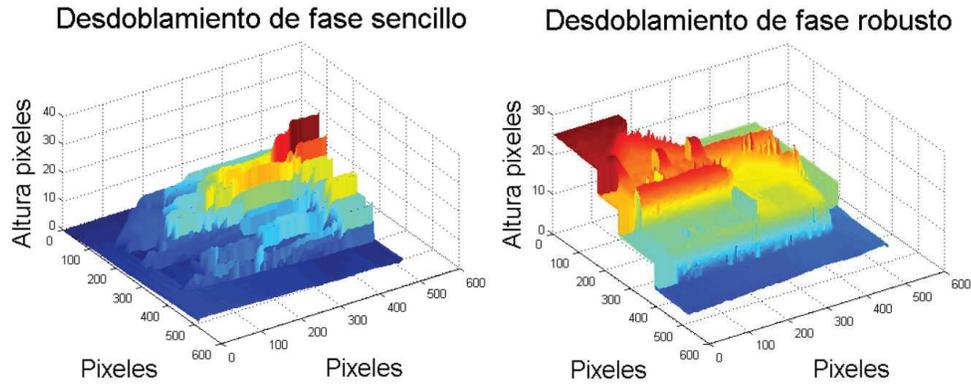
**Figura 13. Resultado Objeto opaco dimensiones pequeñas.**

La digitalización realizada al objeto de la figura 7, que consiste en un sol de barro y que presenta morfología clasificada como de complejidad moderada y una superficie opaca se puede apreciar en la figura 14, la digitalización obtuvo un resultado satisfactorio dentro de un análisis cualitativo, dado que se puede apreciar la morfología del objeto adecuadamente, las orillas y la elevación central es consistente con el objeto digitalizado, el resultado mostrado tanto con el algoritmo de desdoblamiento de fase sencillo como con el robusto generan resultados satisfactorios, en comparación con los objetos previos, debido a que el número de franjas que se proyectan sobre el objeto y la no reflectividad del mismo, permite que las franjas se deformen adecuadamente generando con ello el resultado obtenido.



**Figura 14. Resultado Objeto morfología moderada.**

La digitalización del objeto mostrado en la figura 8, correspondiente a la fachada de una casa, se puede apreciar en la figura 15. Como se mostró en la figura ,9 la cantidad de elementos texturizados del objeto impiden que las franjas puedan deformarse adecuadamente, por lo que al realizar el proceso con un desdeoblamiento de fase sencillo la digitalización no es satisfactoria. La cantidad de deformaciones provoca que dicho algoritmo no obtenga un resultado acorde con la morfología del objeto, por el contrario, al utilizar un algoritmo robusto se pueden apreciar algunas de las características morfológicas del objeto, aunque no se aprecian otras como la textura de los ladrillos y las tejas, donde su forma se pierde por completo.



**Figura 15. Resultado Objeto morfología compleja**

## 6. Conclusiones

Se analizaron las características de objetos que pudieran ser utilizados en el proceso de su digitalización en técnicas perfilométricas. La morfología y el material de la superficie son las principales características analizadas, así como las dimensiones de los objetos. Al aplicar la metodología propuesta se comprobó que los objetos traslúcidos no generan una deformación de franjas adecuada, lo que genera que la escena de franjas deformadas no lleve la información 3D del objeto. Se aplicaron dos algoritmos de desdoblamiento de fase uno sencillo y otro robusto, con lo que queda claro que los objetos traslúcidos, ya sea cristal o plástico no pueden ser digitalizados, sin pasar por un proceso previo como la aplicación de elementos adicionales, tales como: polvos o sprays que opaquen la superficie. Los objetos con superficies opacas y con una complejidad morfológica simple o moderada son ideales para la digitalización siempre y cuando las dimensiones de los mismos permita la proyección de al menos 16 franjas. Los objetos con una morfología compleja y una superficie opaca pueden ser digitalizados pero requieren de algoritmos robustos y post-procesamiento para la obtención de un resultado coherente con el objeto a digitalizar; sin embargo la textura y muchas de las características morfológicas que estos objetos presentan pueden perderse en el proceso tal como sucedió con el objeto mostrado en la figura 8, y su resultado en la figura 15.

## Referencias

- [1]. X. Zexiao, W. Jianguo and Z. Qiumei. "Complete 3D measurement in reverse engineering using a multiprobe system". International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 45, pp. 1474-1486, 2005.
- [2]. Andreas Kolb, Erhardt Barth, Reinhard Koch, Rasmus Larsen, "Time-of-Flight Sensors in Computer Graphics", The Eurographics Association, 2009.
- [3]. Díaz-Cano C. D., Pedraza-Ortega J., et al. "Noise-reduction method based on color channel discrimination applied to laserline 3D reconstruction", Research in Computing Science 101, p.p. 53-63, 2015.
- [4]. Escobar R, Pedraza-Ortega J. et al., "Novel approach to eliminate discontinuities in phase unwrapping applied to Phase-Shifting Profilometry", Research in Computing Science 101, p.p. 43-52, 2015.
- [5]. Téllez-Zamora C., et al. "Sistema para digitalización y modelado 3D de objetos, mediante proyección laser utilizando hardware de arquitectura abierta.", Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico (CIINDET), 2011.
- [6]. H. Lan, Y. Ding, J. Hong and B. Lu, "A reconfigurable cross-sectional imaging system for reverse engineering based on a CNC milling machine.", Int. J. Adv. Manuf. Technol. DOI 10.1007/s00170-007-0962-7, 2007.



- [7]. Min Zhong, Feng Chen, Chao Xiao, Yongchao Wei. “3-D surface profilometry based on modulation measurement by applying wavelet transform method”, Volume 88, January 2017, Pages 243-254, 2017.
- [8]. Moya Morales J. C., et al (2012) Juan Carlos Moya Morales, Carlos Alberto Ramos Arreguín, Artemio Sotomayor Olmedo, Efrén Gorrostieta Hurtado, Juan Manuel Ramos Arreguín, Jesús Carlos Pedraza Ortega, Saúl Tovar Arriaga, José Emilio Vargas Soto, “A strategy for 3d object digitalization using pre-filtering and post-filtering stages”, The 2012 Electronic Engineering and Computer Science Latin American Conference (CIIIECC in Spanish), ISSN: 2212-0173, pp: 273-281, Zapopan Jalisco, México, 2012.
- [9]. Takeda Mitsuo, et al (1982) Takeda Mitsuo, Hideki Inna and Seiji Kobayashi, “Fourier transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry”. J. Opt. Soc. Am Vol. 72, No.1 156-160.
- [10]. Bioucas-Dias, J.M. and Valdaño. G. “Phase unwrapping via graphcuts”. Image Processing, IEEE Transaction on, Vol16 (3), 698-709. (2007)



# Desarrollo de un Microscopio de Contraste en Polarización de Campo Cercano en Modo Colección

Almendárez Rodríguez Juan, Lastras Martínez Luis Felipe.

Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO), Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP).

## Resumen

*Las técnicas de reflectancia y reflectancia diferencial son ampliamente utilizadas en la caracterización de las propiedades de la superficie de aleaciones de metales, materiales semiconductores, entre otros, ya que se trata de técnicas que no son invasivas y que por lo tanto la muestra no sufre ningún daño durante el escaneo. En este trabajo se presenta el desarrollo, puesta en marcha y calibración de un sistema de microscopía de barrido de alta resolución basado en el efecto de campo cercano, que cuenta con la capacidad de realizar la caracterización tanto de reflectancia y reflectancia diferencial, como de la morfología de la muestra utilizando la técnica de la microscopía de fuerza atómica (AFM), además también se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de diferentes muestras de interés científico y tecnológico fabricadas por distintos laboratorios.*

**Palabras clave:** desarrollo, automatización, LabVIEW, reflectancia, reflectancia diferencial, microscopía de campo cercano, nanómetro, arreglo óptico.

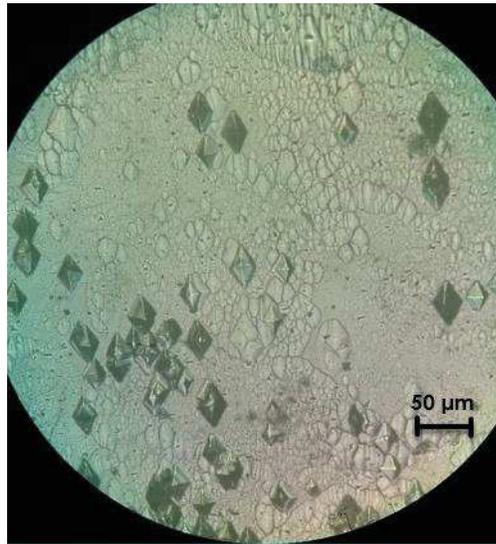
## 1. Introducción

La sociedad moderna demanda la sofisticación en los sistemas tecnológicos, en especial en lo relacionado con la nanotecnología. Esto se encuentra fuertemente asociado a la búsqueda de nuevos dispositivos que cumplan con características nanométricas, que están íntimamente ligadas con el funcionamiento de dichos dispositivos. Un punto importante es encontrar un balance entre las ventajas que ofrece la nanotecnología (tamaño) con la disipación de energía generada por las diversas funciones realizadas por los sistemas generados, lo cual implica tener el control de las propiedades de las nanoestructuras de forma no destructiva, como en la generación de microprocesadores.

Con la tendencia en el uso de fuentes de energía limpia y renovable, al igual que su ahorro, actualmente se desarrollan paneles solares de gran capacidad y de menor tamaño comparados con los existentes hace 20 años, se realiza un amplio estudio en la fabricación de diodos emisores de luz (led's) de alta luminosidad y bajo consumo de energía, por lo que se ha vuelto de gran importancia el estudio de las propiedades de materiales semiconductores como silicio, galio, germanio, arsénico, etc., y las combinaciones que surgen de estos. De manera particular, las propiedades ópticas de los sistemas nanoestructurados (Fig. 1) son de fundamental importancia, ya que los dispositivos formados de diferentes materiales rompen la simetría cristalina, lo cual está íntimamente ligado con su funcionalidad óptima. Una de las espectroscopias ópticas que se ha cultivado desde hace 30 años es la espectroscopia de reflectancia diferencial (RD), dicha espectroscopia mide la diferencia en reflectividad entre dos ejes mutuamente perpendiculares, con lo cual se obtiene un mayor contraste.

Las investigaciones llevadas a cabo en estos materiales con RD, se había realizado a un nivel micrométrico, pero debido a la miniaturización de los dispositivos generados a partir de los materiales semiconductores, es necesario realizar estudios a nivel nanométrico, por lo cual se buscan y

desarrollan nuevas técnicas de observación y caracterización de las propiedades que presentan estos materiales en campo cercano.



**Figura 1. Defectos estructurales generados por ataque químico en GaAs.**

El hombre en su afán de descubrimiento, de la explicación lógica del porque suceden ciertos fenómenos en la naturaleza, comenzó con la observación, por lo que en un principio para poder observar objetos, que son demasiado pequeños para analizar y caracterizar a simple vista se empleó el microscopio óptico, que fue desarrollado en 1590<sup>[1]</sup> por el fabricante de anteojos de origen holandés llamado Zaccharias Janssen. El cual basa su funcionamiento en la refracción, ya que normalmente depende de la luz que atraviesa la muestra desde abajo. Por lo tanto la resolución de los microscopios ópticos está restringida por el fenómeno llamado difracción, que dependiendo de la apertura numérica ( $A_N$ ) del sistema óptico y de la longitud de onda de la luz utilizada ( $\lambda$ ), se establece un límite definido ( $\delta$ ) a la resolución óptica, por lo que suponiendo que las aberraciones ópticas fueran despreciables, la resolución de los microscopios estaría dada por la siguiente ecuación: <sup>[2]</sup>

$$\delta = \frac{\lambda}{2 * A_N} \quad (1)$$

donde  $\lambda=550$  nm correspondiente a la luz verde; si el medio es el aire, la  $A_N$  práctica máxima que se puede obtener es de 0.95, y en el caso de tratarse aceite es de hasta 1.5<sup>[3]</sup>, pero tendría que sumergirse en este, por lo que podría causar algunos daños a la muestra. Lo anterior implica que incluso el mejor microscopio óptico está limitado a una resolución de unos 0.2 micrómetros y la resolución máxima para un microscopio que usa luz visible es de alrededor de 0.3 micrómetros, debido a esto se siguen desarrollando sistemas de medición y caracterización que van más allá de los límites, por lo que dos clases de técnicas para mejorar la resolución óptica de los instrumentos, estudiadas ampliamente son:

- Radiación con longitudes de onda menores (electrones, rayos x).
- Microscopia de sonda (de efecto de túnel, fuerza atómica).

Los problemas que presentan estas técnicas es que son: destructivas, de elevado costo, muy lentas, poco fiables, la muestra se tiene que preparar y deben de realizarse al alto vacío. Es por eso que se buscan nuevos sistemas que no tengan esas limitaciones, que además sean económicos pero que primordialmente no dañen la muestra que se caracteriza. Una respuesta a este problema puede ser la combinación de la interacción de los mecanismos de la microscopia óptica y la alta resolución



de la microscopía de sonda, llegando así al desarrollo de la técnica del Escaneo Óptico Microscópico de Campo Cercano conocido como SNOM por sus siglas en inglés (Scanning Near-Field Optical Microscopy)<sup>[4]</sup>, la cual nos permite formar imágenes de las muestras que se escanean, con una resolución más allá del límite de difracción mostrada por los microscopios ópticos.

La técnica de SNOM permite reconstruir imágenes con una resolución del orden de  $\lambda/60$  o mayores, ya que solo depende de la resolución de los sistemas mecánicos, mediante los cuales se lleva a cabo el posicionamiento de la muestra mientras esta es escaneada y del diámetro de la apertura de las puntas (Fig. 2) que se utilizan para recolectar y guiar la señal lumínica.



**Figura 2. Punta de fibra óptica, utilizada para el escaneo del microscopio de barrido de campo cercano desarrollado en este trabajo.**

Para explotar de la mejor forma la técnica de SNOM, es necesario cumplir básicamente con tres requerimientos:

- Una apertura óptica muy pequeña (algunos cuantos nanómetros de diámetro), la cual parcialmente define la resolución óptica del sistema de microscopía basado en la técnica de SNOM de reflexión.
- Una forma de colocar la superficie de la muestra que se va a medir, a una distancia de separación entre esta y la punta de fibra óptica de unos cuantos nanómetros, sin que lleguen a entrar en contacto.
- Una forma de reconstruir las características de la muestra que se están midiendo, es decir almacenar los datos de cada punto escaneado para su procesamiento en un equipo de cómputo, el cual además permite realizar la reconstrucción de la imagen de la muestra.

El desarrollo implica la implementación de sistemas mecánicos, electrónicos y ópticos, que deben estar gobernados por un solo software de control, el cual permita la interacción armónica de estos, sin tener que acceder a cada uno de sus softwares para hacer modificaciones. A continuación la Fig. 3 muestra una de las configuraciones básicas para el desarrollo y la implementación de un sistema de microscopía basado en la técnica de SNOM.

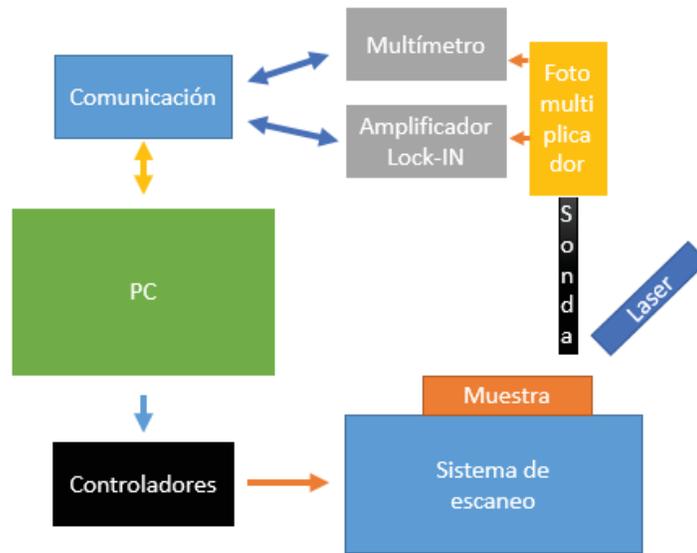


Figura 3. Esquema de la configuración del equipo usado en el proceso de implementación y desarrollo de SNOM.

## 2. Arreglo experimental del microscopio.

El desarrollo del sistema de microscopía de alta resolución basado en el efecto de campo cercano, se compone principalmente de tres secciones:

- El sistema mecánico, con el cual se logra posicionar en campo cercano la punta de fibra óptica y la muestra, además de desplazar esta para realizar su escaneo y caracterización, con él también se define la resolución que tendrá el sistema, ya que si el desplazamiento mínimo es mayor al diámetro de la apertura de la punta, la resolución será menor, está conformado tanto por las mesas de desplazamiento micrométrico como nanométrico de los ejes coordenados XYZ y los dispositivos de posicionamiento óptico (bases magnéticas, vástagos, nueces, etc.).
- El arreglo óptico, está basado en lentes, láseres, objetivos de microscopio, puntas de fibra óptica, polarizadores, etc., su función principal es la de brindar las condiciones ópticas necesarias (haz laser polarizado, introducción de señal portadora para el filtraje de otras fuentes de luz, etc.), para realizar la caracterización de la muestra mediante reflectancia o reflectancia diferencial, sin el arreglo óptico el desarrollo del microscopio no sería posible.
- Hardware y software de control, se trata principalmente de los controladores de los sistemas de posicionamiento, los instrumentos encargados de convertir las señales ópticas en eléctricas (fotomultiplicador, multímetro digital, amplificador Lock-IN, etc.) para su interpretación y del software desarrollado para el control y funcionamiento armónico de los sistemas que conforman el microscopio desarrollado, encontrándose como componente principal el equipo de cómputo donde se almacena el software y es conectado el hardware para su control.

Existen tres tipos de microscopios de barrido de campo cercano (Fig. 4), que se dividen según la forma en la que se recolecta la información proveniente de la muestra:

- Por reflexión, donde la muestra es iluminada mediante un haz laser cuya longitud de onda no es absorbida por el material de la muestra que se caracteriza, sino más bien es reflejado y este es colectado mediante la punta de fibra óptica, con un diámetro de apertura de unos cuantos nanómetros, encontrándose esta en campo cercano con respecto a la muestra.

- Transmisión, en este modo el haz laser es acoplado a la terminal de mayor diámetro de la de fibra óptica, mientras que la terminal de menor diámetro es utilizada para iluminar la muestra, ya que este es demasiado pequeño solo se transmite una cierta cantidad de fotones hacia la muestra, que atraviesan esta, por lo que se coloca un detector detrás de la muestra para realizar la caracterización de esta.
- Modo de colección, en este la muestra es iluminada desde la parte inferior y solo el haz laser que atraviesa esta es colectado por la parte superior de la muestra, mediante la punta de fibra óptica, en este caso el haz laser debe de focalizarse en cierta área de la muestra, esto se logra mediante el uso de objetivos de microscopio.

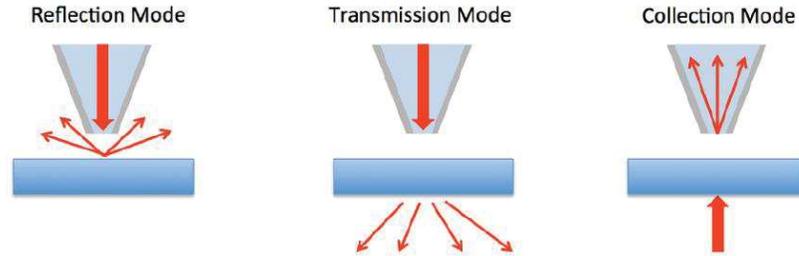


Figura 4. Modos de escaneo de microscopios de campo cercano. [5]

El microscopio de barrido de campo cercano desarrollado utiliza el modo de reflexión y este se encuentra en el laboratorio de espectroscopia 2, montado sobre una mesa óptica aislada con la finalidad de filtrar cualquier vibración proveniente del medio ambiente, la cual pueda provocar mediciones erróneas o que la punta de fibra óptica y la muestra no se encuentren en campo cercano, además se encuentra aislado de los haces de luz externa mediante cortinas especiales y vidrios polarizados, ya que se debe de tener cuidado con la cantidad de luz que se encuentra presente en el laboratorio mientras el sistema se encuentra encendido, ya que el fotomultiplicador se puede saturar y dañarse, este se encuentra conectado al amplificador Lock-IN, en el cual el voltaje de entrada no debe de exceder de 1 volt, sin embargo la fuente del fotomultiplicador tiene una salida de hasta 15 volts, pudiendo dañar de igual forma al amplificador.

Se utilizan dos tipos de mesas, las micrométricas que proveen al sistema un avance grueso y un desplazamiento de hasta 2.5 cm, ya que su avance mínimo es de 200 nm, con lo cual la resolución del microscopio sería muy pobre, se colocó sobre estas las mesas nanométricas, las cuales tiene un avance mínimo de 200 angstroms dotando al sistema mecánico de la suficiente resolución para la realización del escaneo de la muestra, ya que las puntas de fibra óptica tienen un diámetro de 100 nm en su apertura, el esquema de esto se muestra en la figura 5.

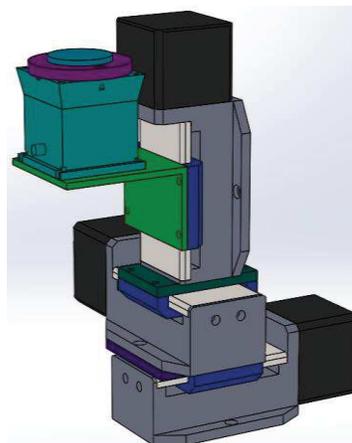
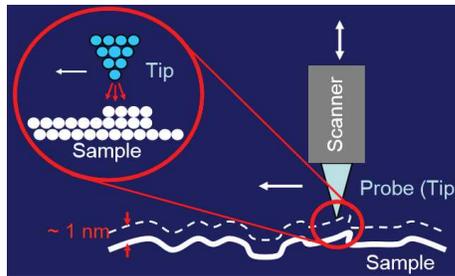


Figura 5. Esquema de montaje de las mesas de movimiento micrométrico y nanométrico.

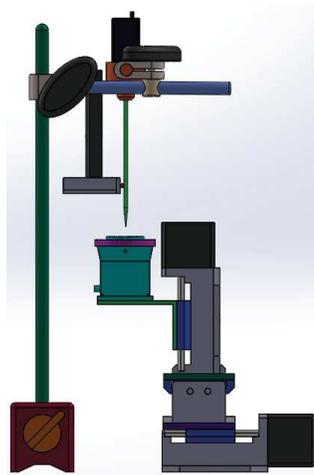
Debido a que el microscopio de barrido desarrollado utiliza una punta de fibra óptica como sonda para realizar el escaneo de la muestra, estas deben de encontrarse en campo cercano, para de esta forma poder romper la resolución de los microscopios ópticos, por lo que es necesario la implementación de un sistema mecánico y electrónico, el cual tiene un funcionamiento muy parecido al microscopio de fuerza atómica (AFM), lo cual permite acercar la punta de fibra óptica hasta unos cuantos nanómetros de la muestra que se va a medir encontrándose ambas en campo cercano.

El sistema se apoya en el uso de las fuerzas electrostáticas que tienen todos los materiales presentes en la superficie, pero que solo se detectan en el campo cercano (Fig. 6), por lo que para lograr la detección de estas fuerzas, la punta de fibra óptica (sonda) se hace vibrar a una frecuencia de 200 Hz (ya que no es múltiplo o submúltiplo de 60 Hz, con la que pueda haber detecciones falsas con la toma de corriente), después se va acercando la muestra a la punta mediante el uso de las mesas de desplazamiento, paso a paso mientras se detecta que la frecuencia permanezca constante y sin variar, una vez que la frecuencia tiene una variación (mayor a 0.05 Hz) significa que la muestra y la punta se encuentran en campo cercano, por lo que el desplazamiento de la muestra en el eje Z se detiene, de tal forma que nunca entra en contacto la sonda y la muestra.



**Figura 6. Interacción de sonda con muestra mediante fuerzas electrostáticas. [6]**

En la figura 7, se muestra el montaje del sistema escaneo de las mesas tanto micrométricas como nanométricas con el sistema de adquisición de la señal recibida de la muestra. Es recomendable que la punta de fibra óptica se encuentre centrada en el portamuestras de forma que el desplazamiento pueda realizarse de igual forma en ambos sentidos de los ejes coordenados XY, mientras que el eje Z se encuentre posicionado a una tercera parte de su desplazamiento, lo cual permitirá retirar manualmente la muestra sin que esta llegue a chocar con la punta y por lo tanto se llegue a dañar, ya que aunque se encuentre recubierta de aluminio debido a su diámetro es demasiado frágil.



**Figura 7. Montaje físico de sistema de escaneo y adquisición.**



El láser utilizado para la iluminación de la sonda y generación del patrón de difracción, mediante el cual se caracteriza la frecuencia de vibración, es de color rojo cuya longitud de onda es de 632.8 nm y debe permanecer encendido durante la realización de la caracterización de la muestra, por lo cual no debe de ser interrumpido ya que esto afecta la frecuencia de vibración y por lo tanto el proceso de colocación de la muestra y la punta para que estas se encuentren en campo cercano. Este laser es colocado mediante una base magnética, para tener la posibilidad de desplazarlo y ajustar la altura según se requiera, cabe mencionar que no se requiere del uso de polarizadores para el haz que emite, ya que solo se detecta el patrón de difracción generado.

Una vez que se realiza la incidencia del haz laser sobre la punta de fibra óptica del sistema, se coloca el fotodiodo junto con su electrónica en una base magnética en el lado contrario en el cual está colocado el láser, para poder generar el patrón de difracción y que este sea detectado de forma correcta. Para que el haz laser con que se ilumina la muestra sea polarizado, es necesario colocar a la salida de este un polarizador y para agregar la modulación se hace uso de del retardador mecánico (Chopper) en cuanto se requiere medir solo reflectancia, cuando se desea medir reflectancia diferencial (RD) se requiere el uso de un modulador fotoelástico (PEM), ya que con él se puede medir la diferencia entre las polarizaciones "S" y "P".

Para que el sistema funcione de forma correcta es necesario colocar la sonda en el vértice del ángulo que se forma entre el haz incidente y el haz reflejado, si la fibra se coloca muy fuera de este ángulo la señal adquirida tendrá componentes de reflejos del haz con lo cual la caracterización será ruidosa y si los detalles de la morfología son demasiado pequeños, estos no se apreciarán, en caso de que la sonda sea colocada en la periferia del ángulo generado por los haces, la reflectancia será muy pequeña por lo que el nivel de amplificación de la señal de salida del fotomultiplicador deberá ser muy grande y se deberá tener cuidado con no llegar a saturar la entrada del amplificador Lock-IN, cuando la fibra se coloca muy cerca del ángulo o en este se obtiene una buena señal de reflectancia y los pequeños detalles de la morfología son mucho más notables en la caracterización de la muestra.

Mediante el uso de la cámara CCD implementada en el arreglo óptico desarrollado del microscopio de barrido de campo cercano, se puede realizar la colocación de la sonda en el vértice del ángulo formado entre los haces incidente y reflejado, ya que se puede observar el punto donde incide el haz laser sobre la muestra, ya que en este se encuentra una mayor intensidad de la luminosidad, en la figuras 8, se puede observar el arreglo experimental completo del sistema de microscopia de alta resolución basado en el efecto de campo cercano.

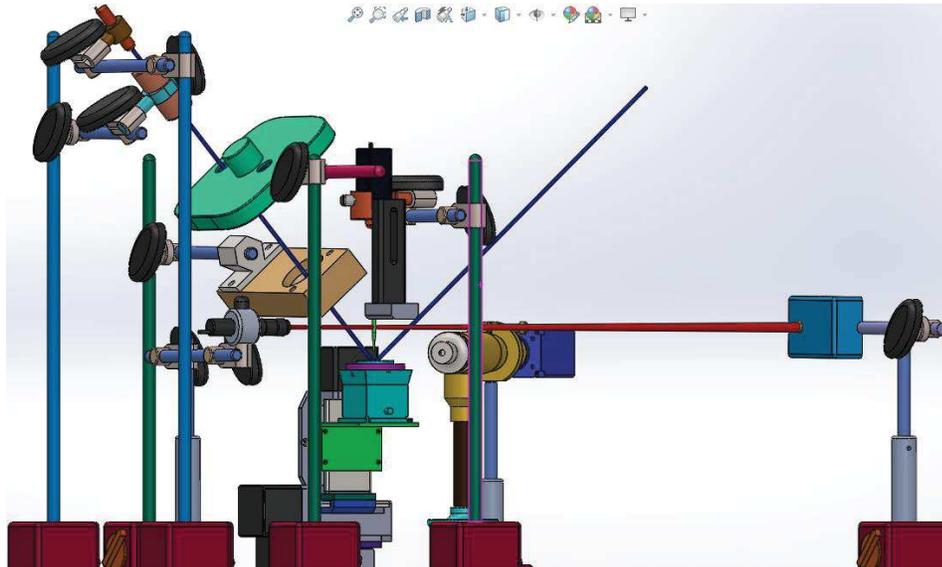


Figura 8. Arreglo experimental del microscopio de barrido desarrollado.



### 3. Programación del microscopio mediante LabVIEW.

Cada uno de los sistemas electrónicos que componen el microscopio de barrido de campo cercano (SNOM), cuenta con su propio software de control, desarrollado por su fabricante, el problema se encuentra en que no existe ningún tipo de interconexión entre estos, por lo que no pueden trabajar de forma conjunta, debido a esto existe la necesidad de generar un software de control para todos y cada uno de ellos, puesto que para el desarrollo es importante que todos los sistemas trabajen de forma armónica y que solo un software sea el que los controle, los sistemas que se automatizaron fueron los siguientes:

- Mesas de movimiento micrométrico XY.
- Mesa de movimiento micrométrico Z.
- Amplificador Lock-IN.
- Multímetro KEITHLEY.
- Modulador fotoelástico PEM100.
- Sistema de movimiento nanométrico XYZ.
- Cámara CCD PixeLINK modelo PL-B957F.
- Retardador mecánico Stanford Research Systems modelo SR540 Chopper.
- Piezoeléctrico PI miniature Multilayer Piezo Actuators.

Cada sistema individual cuenta con un conjunto de instrucciones específicas para su control, adquisición de datos y comunicación con la computadora, no es conveniente para el desarrollo, ya que resultaría tedioso y muy tardado el activar cada software de forma manual. Por lo que se realizó la lectura de los manuales de estos instrumentos para la generación de sus propios instrumentos virtuales mediante el software de desarrollo LabVIEW, con la finalidad de que el sistema sea modular.

LabVIEW es el acrónimo de banco de trabajo del laboratorio virtual de ingeniería de instrumentación (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) <sup>[7]</sup>, desarrollado por la empresa National Instruments (NI), lanzando su primera edición en 1986 para el sistema de computadoras Macintosh, el cual es un entorno especializado en informática industrial y científica, este basa su lenguaje de programación en gráficos (lenguaje G) <sup>[8]</sup>, por lo que permite el desarrollo de programas para la automatización de sistemas, programas informáticos de alta complejidad facilitando la programación y disminuyendo los tiempos de esta, etc., por lo tanto los plazos de desarrollo de nuevos proyectos disminuye.

Utiliza un modelo de flujo de datos en lugar de líneas secuenciales de código de texto, lo que le permite escribir código funcional utilizando un diseño visual que se asemeja al proceso de pensamiento <sup>[9]</sup>, la programación se hace mediante iconos los cuales representan una tarea específica o un conjunto de ellas, estos se encuentran ligados entre ellos por cables quienes representan el flujo de datos (su color indica el tipo de dato que corre a través de él), es decir aparentan un poco a la forma en que funciona una tarjeta electrónica con sus componentes y circuitos integrados. Ya que cuenta con una arquitectura abierta permite la integración de cualquier dispositivo de hardware, sin importar su fabricante y de esta forma poder desarrollar cualquier enfoque de software. <sup>[10]</sup>

Con las características antes mencionadas el software de programación LabVIEW, es la mejor opción para el desarrollo del microscopio de barrido de campo cercano, ya que como se mencionó anteriormente se necesitan diversos equipos y sistemas electrónicos que deben de estar gobernados por un solo software, sin necesidad de estar interactuando con distintos programas cada vez que se requiera realizar la medición de cada uno de los puntos que conforman la muestra, ya que si esto tuviera que ser así el tiempo de caracterización sería demasiado largo y la persona operando el sistema pasaría demasiadas horas frente a la computadora de control.

Ya que LabVIEW es una herramienta multifuncional, en la programación de sistemas automatizados, que permite la generación de subprogramas de forma sencilla, se realiza la automatización de cada uno de los instrumentos antes mencionados de forma individual, para que cada uno pueda ser manejado por separado en caso de así requerirse, además se generaron



instrumentos virtuales para ser integrados en un solo software, el cual controle todos los sistemas de forma armónica, sin la necesidad de estar realizando cambios en esta cada que un punto es medido.

Los siguientes subtemas tratan de cada uno de los sistemas que se involucran en el desarrollo del microscopio de barrido de campo cercano, la programación generada y su funcionamiento.

### 3.1 Mesas de movimiento micrométrico XY.

Para realizar el posicionamiento de las muestras que se van a medir es necesario contar con un sistema de movimiento mecánico, el cual se pueda controlar mediante el software de control del desarrollo y de esta forma poder dirigir el desplazamiento de este sistema. Por tal motivo se realizó la automatización de las mesas de movimiento micrométrico XY, de la marca Newmark systems, inc modelo MS-1-24, con control de movimiento inteligente.

El movimiento de las mesas, se realiza mediante motores a pasos, los cuales hacen que sean más exactas en su movimiento. Para el control de este tipo de motores, es necesaria la implementación de un circuito de control llamado puente H, en este caso no es necesario armar el circuito, ya que se cuenta con el controlador para este tipo de actuadores lineales, el cual es el NSC-G de la misma marca. Este controlador cuenta con una interfaz de comunicación RS-232, como este puerto de comunicaciones, ya no está disponible en las computadoras actuales, se colocó un adaptador de USB a serial.

El software que se desarrolló lleva el nombre de “Movimiento micrométrico XY”, el cual consta de dos partes principales, una de ellas es el panel frontal en el cual se encuentran los botones de activación del movimiento de los actuadores, una casilla para cada grado de libertad, en la cual se coloca la distancia de desplazamiento deseado por el usuario, un botón de paro y los indicadores de error, este se muestra a continuación en la figura 9.

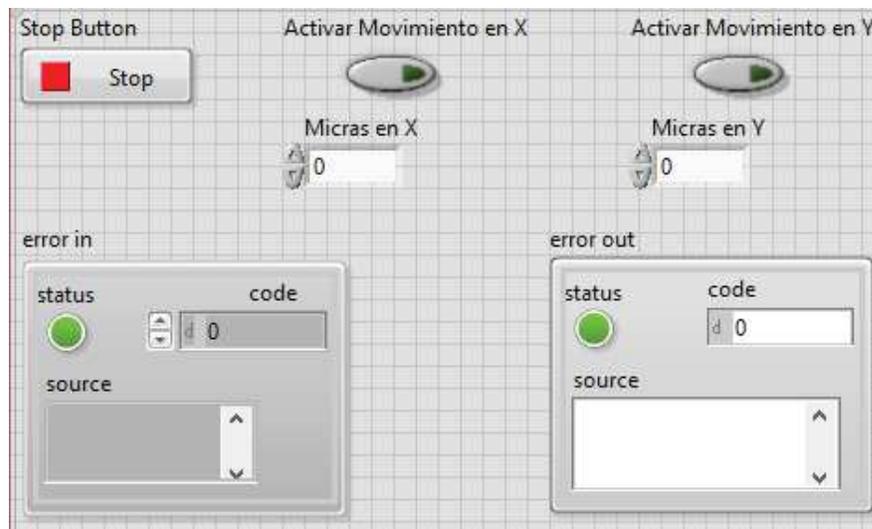


Figura 9. Panel frontal desarrollado para el control de las mesas de movimiento XY.

Dentro de las casillas se coloca la cantidad de micras en el eje X o Y, se tienen que tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- El desplazamiento de las mesas de movimiento es absoluto, es decir si se coloca el valor de 10 en la casilla de micras en X, esta se desplazará 10  $\mu\text{m}$  a partir del punto en que se encontraba.
- Si se coloca un número positivo, el desplazamiento se llevara hacia adelante.
- Si se coloca un número negativo, el desplazamiento se realizara hacia atrás.



- No se debe de exceder la distancia recorrida total de 25000  $\mu\text{m}$ , ya que esto causara que se dañe el mecanismo.
- Si el controlador NSC-G no se encuentra encendido o su cable de comunicación no está conectado a la computadora, el software no iniciara y enviara un mensaje de error.
- Se cuenta con un botón de stop para detener la ejecución del programa y así evitar que por error el mecanismo se desplace causando daños a la fibra o la muestra que se está midiendo.

El diagrama de bloques desarrollado para este instrumento virtual se muestra a continuación (Fig. 10), el cual está basado principalmente en estructuras de casos y la comunicación serial.

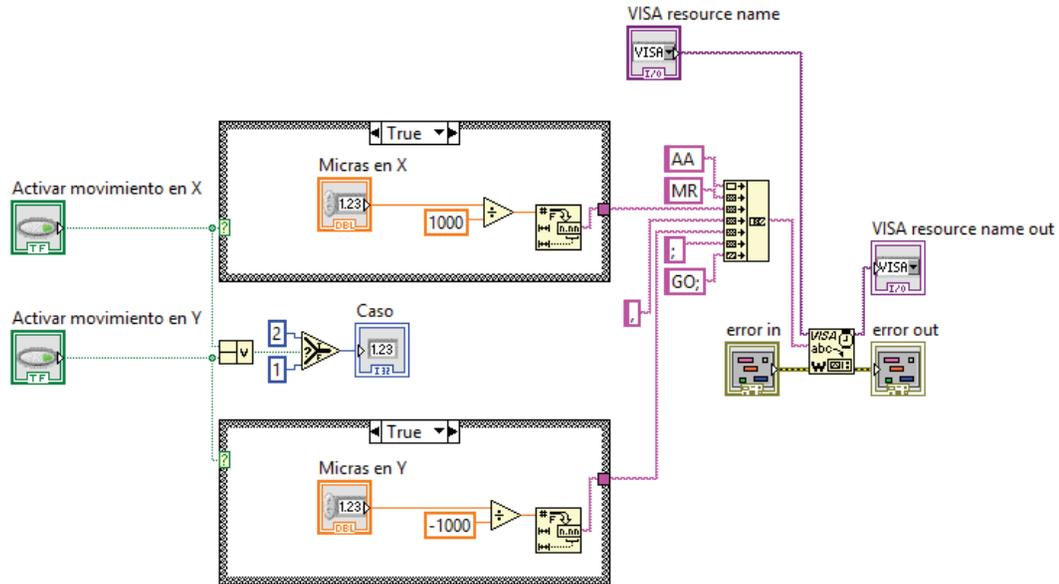


Figura 10. Diagrama de bloques del VI.

### 3.2 Mesa de movimiento micrométrico Z.

Mediante las mesas de movimiento micrométrico XY se puede realizar un escaneo de la muestra, pero también es necesario realizar un acercamiento de la punta de fibra óptica a la muestra hasta unas pocas micras sin que estas entren en contacto, esto debe de realizarse de forma sistemática ya que manualmente sería demasiado tardado y podría romperse la punta, puesto que su diámetro es un poco mayor a los 100 nanómetros. La mesa de movimiento micrométrico del eje Z es el modelo MS-1-24 de la marca Newmark Systems, inc., Ya que esta mesa de movimiento micrométrico se adquirió unos meses después, que los actuadores lineales XY, el tipo de controlador es diferente y en este caso se cuenta con el modelo NSC-1S, con el cual solo puede controlar un grado de libertad.

Se desarrolló un nuevo instrumento virtual en el software LabVIEW, nombrado “Movimiento micrométrico Z”, mediante el cual ya no es necesario ir introduciendo cada una de las instrucciones paso a paso, para que el controlador se active, solo es suficiente que en el panel frontal (Fig. 11), se introduzca la cantidad de micras que se requieren desplazar para acercar o alejar la muestra de la punta de fibra óptica y dar clic en el botón de activar movimiento.

Para acercar la muestra a la punta es necesario introducir números positivos, mientras que para retirarla se introducen valores negativos en el control numérico denominado “micras en Z”. El tiempo de espera entre un movimiento y el siguiente es de un segundo con la finalidad de que el sistema lleve a cabo por completo el desplazamiento indicado, ya que de no ser así el recorrido podría ser menor al indicado, y por lo tanto causar que el escaneo de la muestra sea incorrecto.

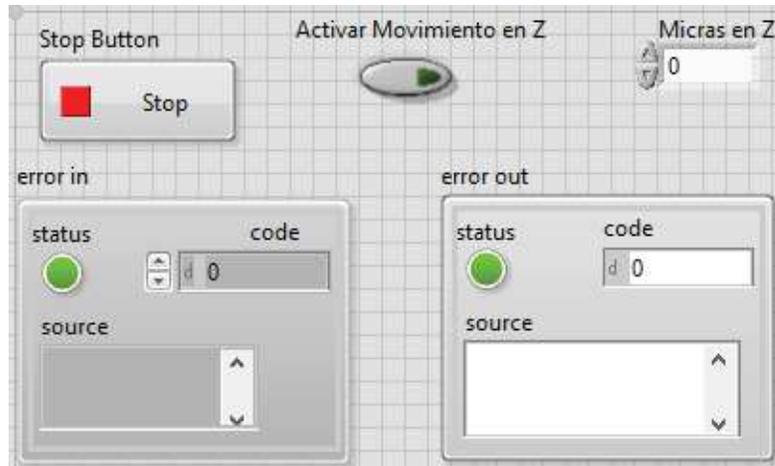


Figura 11. Panel frontal del VI del movimiento micrométrico en Z.

Se implementan los módulos de error en el desarrollo de su diagrama de bloques (Fig. 12), como protección al hardware, ya que en caso de perderse la comunicación inmediatamente se detiene la ejecución del instrumento virtual, evitando de esta forma que se envíen datos, que cuando se recupere la comunicación provoquen que se realice un movimiento no requerido que pueda llegar a dañar la muestra o la punta de fibra óptica mediante la cual se realiza el escaneo.

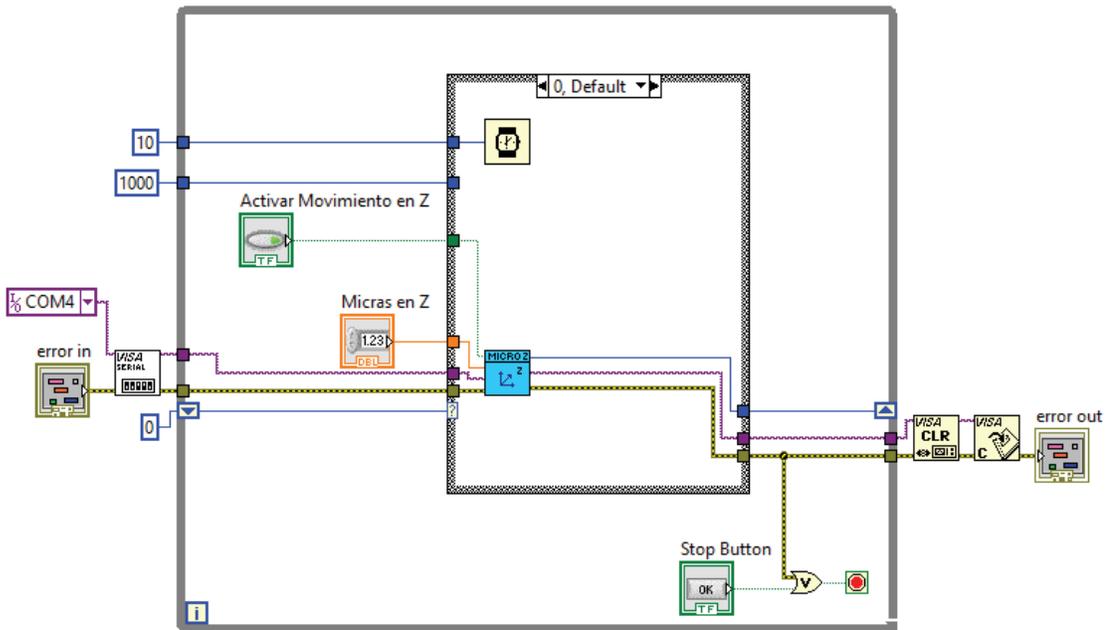


Figura 12. Diagrama de bloques del movimiento micrométrico en Z.

### 3.3 Amplificador Lock-IN SR530.

Como ya se mencionó anteriormente la muestra es iluminada con un haz laser, por lo tanto se está recolectando una señal lumínica, la cual puede ser afectada por cualquier otra fuente de luz presente en el medio ambiente como la luz del sol, la iluminación de los indicadores de otros instrumentos, el monitor de la computadora con la cual se controla el sistema, etc., por lo que se obtendrían mediciones erróneas, para que este problema no afecte la medición a realizar, el haz mediante el cual se ilumina la muestra es modulado mediante el uso de un modulador fotoelástico, el cual produce una modulación de la polarización del haz laser con una frecuencia específica.



Una vez que el haz laser es modulado, la señal que se está captando por medio de la fibra óptica, puede ser filtrada mediante el uso del amplificador Lock-In modelo SR530 de la empresa Stanford Research Systems, el cual es instrumento de muy alta precisión que puede extraer una señal del orden de nanovolts, con una señal portadora conocida (para este sistema la modulación del haz) de un entorno extremadamente ruidoso del orden de miles de veces mayor a la señal de interés.

Ya que la comunicación del amplificador se lleva a cabo mediante el formato RS232, el cual este ya no se encuentra disponible en la computadora de control donde se desarrolla el proyecto, es necesario el uso de un cable convertidor de comunicación serial, por esta razón y debido al procesamiento de la señal adquirida el amplificador Lock-In, solo puede realizar una medición cada 250 milisegundos, cuando este tiempo es menor los datos recibidos son erróneos.

En la figura 13 se muestra el panel frontal del instrumento virtual llamado “Amplificador Lock-In”, en donde se puede ver cuatro combo box, como los controles principales, esto es debido a que en este instrumento ya vienen preestablecidos los parámetros de funcionamiento, por lo tanto si se llegan a introducir datos distintos a estos ocasionaría que la comunicación se detuviera y por lo tanto tendría que reiniciarse el amplificador Lock-In y la computadora, perdiendo de esta forma los datos de la caracterización que se estuviera llevando a cabo, el combo box permite seleccionar solo los parámetros establecidos evitando que suceda lo anterior.

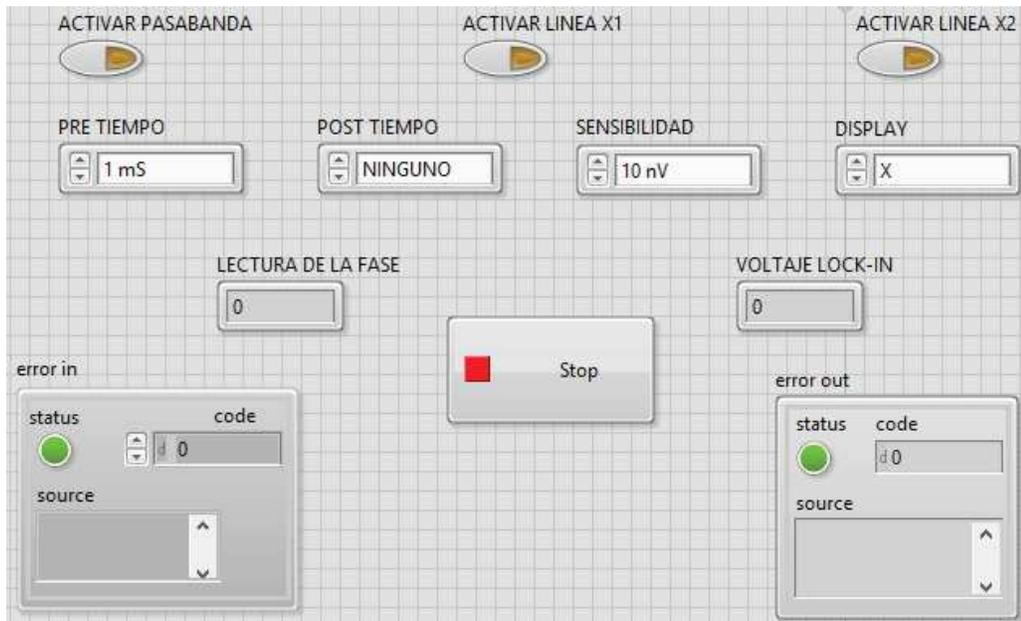


Figura 13. Panel frontal del VI del Amplificador Lock-In.

### 3.4 Multímetro KEITHLEY.

Para realizar el escaneo y la caracterización de la muestra que se desea medir, esta se ilumina mediante un haz laser, en donde los fotones son recogidos y guiados hasta el fotomultiplicador mediante la punta de fibra óptica, este se encarga de convertir la señal lumínica recibida en una señal eléctrica, la cual es medida por medio del multímetro digital de la marca KEITHLEY modelo 2000, mediante este proceso se conoce la reflectividad de la muestra.

Este multímetro digital es de alta precisión y cuenta con 6.5 dígitos, el cual basa su funcionamiento en convertidores analógico-digitales de bajo ruido y de alta velocidad, los cuales lo constituyen como un instrumento de medición muy estable y preciso, por lo que se convierte en un aparato ideal para el desarrollo del microscopio de barrido basado en el efecto de campo cercano.



El panel frontal de este instrumento virtual nombrado “Multímetro Keithley”, se muestra en la figura 14, en la cual se observa que se cuenta con un combo box para seleccionar la magnitud que se desea medir y un indicador numérico, en el que se indica la magnitud de la medición realizada. Este instrumento virtual, realiza una medición cada 150 milisegundos de forma continua, para cambiar la frecuencia con la que se llevan a cabo estas adquisiciones solo es necesario cambiar la constante numérica conectada al módulo wait, también se cuenta con un botón de stop para detener tanto la ejecución del instrumento virtual como la adquisición de la magnitud medida por el multímetro. Se generó el icono de este VI con la finalidad de que pueda ser utilizado como un subprograma que se ejecute de forma conjunta dentro del sistema, en el desarrollo del sistema para la aplicación de la técnica de SNOM.

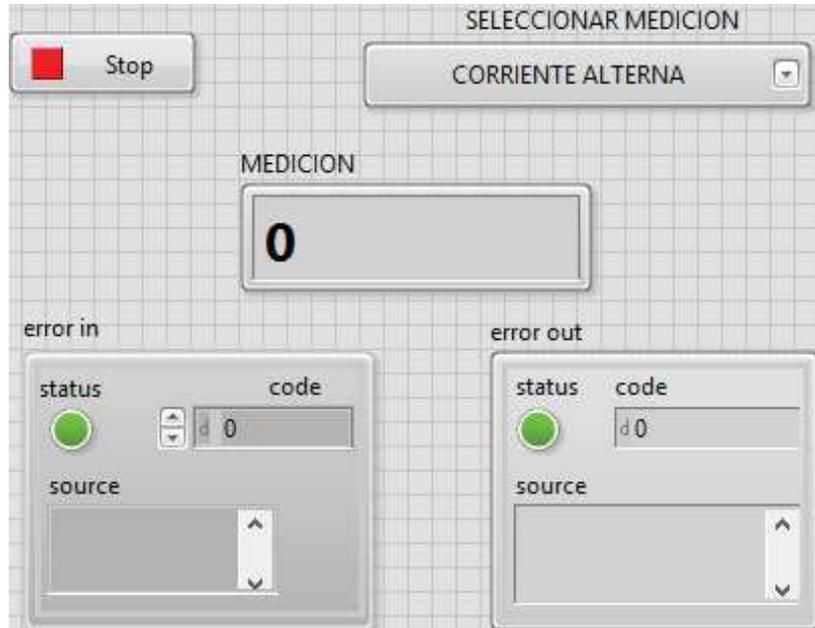


Figura 14. Panel frontal del VI del Multímetro Keithley.

Para que la adquisición se lleve a cabo con la mayor precisión, se utilizan los módulos de real time que tiene incorporados LabVIEW como se observa en la figura 15, además se genera un paro de emergencia dentro del ciclo for, este solo se encuentra disponible en las versiones 13 a superiores, ya que anteriormente cuando se ejecutaba un ciclo for, solo se detenía después de haberse ejecutado la cantidad de veces establecidas en la terminal de conteo del ciclo, por lo que si ocurría un error o se perdía la comunicación, el programa aún seguía ejecutándose.

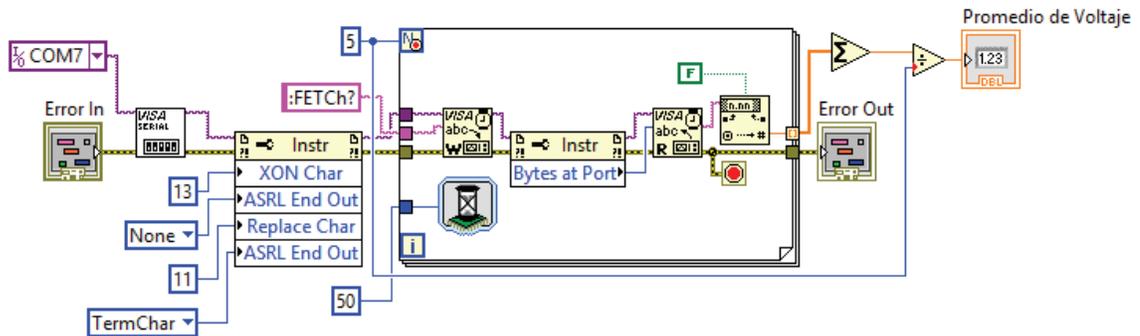


Figura 15. Diagrama de bloques desarrollado para control de multímetro KEITHLEY.



### **3.5 Modulador fotoelástico PEM 100.**

La muestra se iluminara mediante un haz laser, el cual debe ser polarizado y modulado, ya que de esta forma se podrá realizar un filtrado de la luz proveniente del medio ambiente o de las caratulas de los instrumentos que conforman el microscopio de barrido, además de que se obtiene la diferencia entre las polarizaciones “S” y “P”, con lo cual se obtiene un mayor contraste en las características que presenta la muestra, obteniéndose así resultados con menor ruido y mejor definidos. El modulador fotoelástico que se utiliza para el desarrollo del microscopio de barrido de campo cercano, es el PEM 100 de la empresa HINDS Instruments.

El modulador fotoelástico es un sistema opto-electrónico, que como su nombre lo indica basa su funcionamiento en el efecto fotoelástico, en donde una muestra mecánicamente estresada demuestra birrefringencia proporcional a la tensión resultante, este cuenta con elemento óptico transparente (generalmente sílice fundido) unido a un transductor piezoeléctrico, el cual vibra a lo largo de su dimensión a una frecuencia determinada por lo largo del elemento óptico y la velocidad de una onda sonora longitudinal en el material de este. El transductor es entonado a la misma frecuencia y es manipulado por un circuito electrónico, el cual controla la amplitud de la vibración de este. El efecto de birrefringencia oscilante es máximo en el centro de la barra de sílice fundida.

Si el elemento óptico es comprimido, el componente de la polarización paralela al eje del modulador, viaja ligeramente más rápido que la componente vertical, por lo que la componente horizontal conduce la componente vertical después de que la luz pasa a través del modulador. En caso contrario, en donde el elemento óptico es estirado la componente horizontal se retrasa detrás de la componente vertical. El modulador fotoelástico tiene la posibilidad de realizar retardos en la longitud de onda de  $\lambda/2$  y  $\lambda/4$ , según se requiera, además cuenta con una frecuencia de oscilación de 100 KHz, ya que este instrumento tiene su propio software se desarrolló un nuevo instrumento virtual, en el software LabVIEW, puesto que es necesario contar con un solo programa que controle todos los sistemas, ya que de no ser así tendría que activarse cada uno de ellos por separado volviéndose un proceso largo y tedioso.

El instrumento virtual que se desarrolló para el modulador fotoelástico se nombró “PEM-100”, mediante el cual se pueden controlar de forma remota las siguientes variables:

- Retardo de longitud de onda
- Longitud de onda
- Leer retardo
- Leer frecuencia 1
- Leer frecuencia 2
- Inhibir o desinhibir

El panel frontal desarrollado para el control del modulador, se muestra en la figura 16, en el cual se puede observar que también se le desarrollaron tanto icono, como conexiones para este, con la finalidad de que pueda ser usado como subprograma. El diagrama de bloques de este instrumento virtual se encuentra dividido en dos subprogramas, uno de ellos que se encarga de la escritura de los datos que se envían al modulador fotoelástico, mientras que el otro se ocupa de la lectura de los datos provenientes de este.

Esto último se realiza para verificar que realmente las instrucciones se hayan llevado a cabo, ya que cuando el PEM-100 se encuentra trabajando en forma remota su caratula no muestra ningún tipo de información (longitud de onda, retardo, etc.), solo la frecuencia 2 que es a la cual se modula el haz láser que pasa a través del cabezal, por lo que el programa envía los comandos y después se realiza una lectura del estado en que se encuentra el modulador, confirmando que se haya realizado la acción solicitada

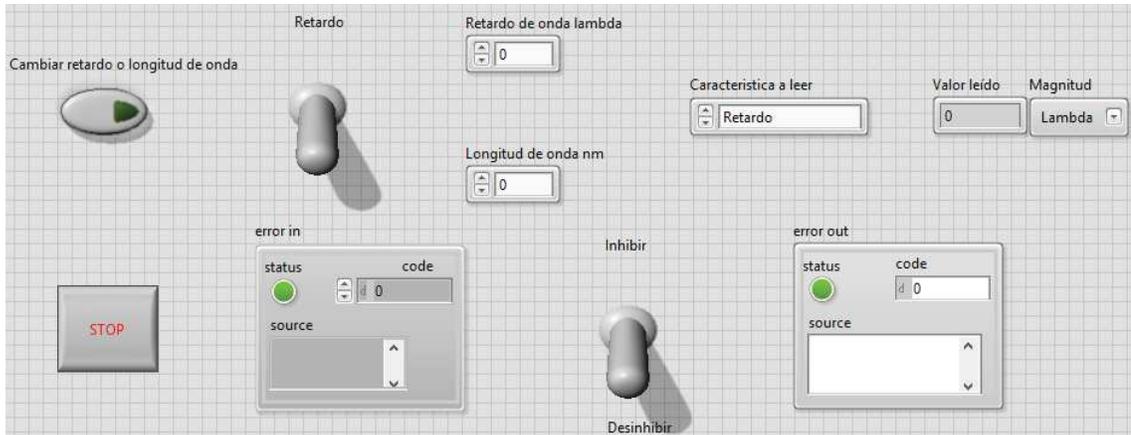


Figura 16. Panel frontal del VI del PEM-100.

Su programación se basa en la escritura y lectura de datos mediante el puerto serial, por lo cual se desarrollaron dos subprogramas, siguiendo los formatos de programación establecidos por la empresa National Instruments, desarrolladora del software LabVIEW, el diagrama de bloques desarrollado mediante el cual se lleva a cabo el control del modulador fotoelástico se muestra en la figura 17.

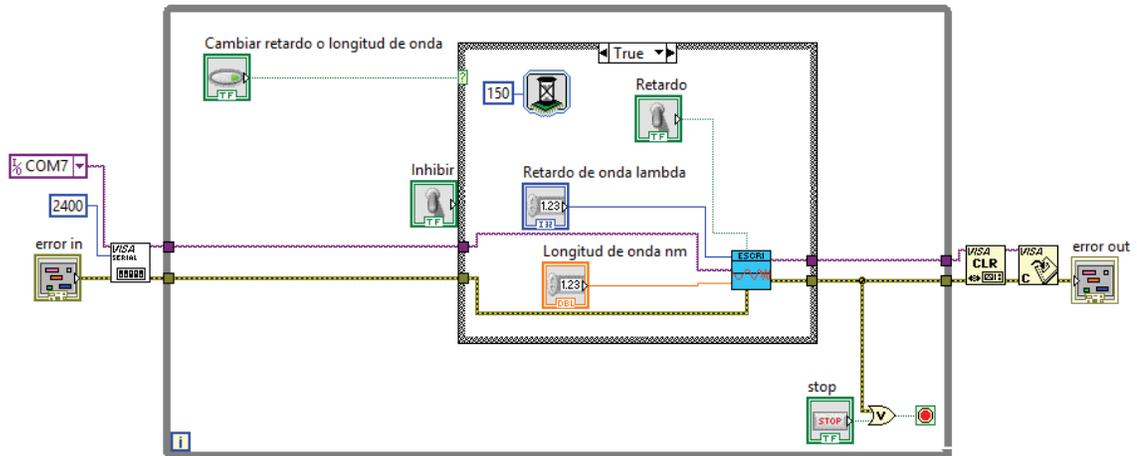


Figura 17. Diagrama de bloques del modulador fotoelástico PEM-100.

### 3.6 Recortador mecánico (Chopper).

El microscopio de barrido basado en el efecto de campo cercano desarrollado cuenta con la capacidad de medir reflectancia y reflectancia diferencial; ya que en la segunda es necesario el uso de un modulador fotoelástico, debido a que se mide la diferencia entre las polarizaciones “S” y “P”, para la medición de reflectancia solo es necesario realizar un filtrado de la luz proveniente del haz laser con que se ilumina la muestra y la luz ambiental que pueda encontrarse presente de forma no deseada. Se necesita un sistema que interrumpa periódicamente el haz, de tal forma que este tenga una frecuencia conocida y así poder realizar un filtrado, por tal razón se utiliza un chopper óptico.

Un chopper óptico es un instrumento que se encarga de interrumpir periódicamente, un haz de luz que pasa a través de él, esto se realiza mediante disco que cuenta con perforaciones distribuidas uniformemente, las cuales permiten el paso del haz de luz, este disco se pone a girar a una velocidad específica, así generando que la interrupción del haz sea periódica y tenga una frecuencia específica.



Para el control de la velocidad con la cual se interrumpe el haz laser que atraviesa el disco del recortador mecánico, se cuenta con un controlador electrónico, el cual tiene un display indicador de frecuencia de cuatro dígitos y un potenciómetro de precisión de diez vueltas para realizar el ajuste de esta, esto es en caso de que se quiera llevar a cabo el cambio de frecuencia de forma manual. El chopper óptico utilizado es el de la marca Stanford Research Systems modelo SR540, al cual se le puede variar la frecuencia de trabajo mediante la entrada de voltaje con que cuenta, la cual va de 0 a 10 volts de corriente directa y es proporcional a la frecuencia que se quiere establecer, la automatización de este sistema se llevó a cabo mediante el uso de la tarjeta de NI 9269 y el chasis cDAQ 9171 de National Instruments. Esta se llevó a cabo con la intención de que la frecuencia establecida sea lo más estable posible, ya que con el ajuste manual se observaban variaciones erráticas de un hertz, además de poder realizar el cambio de frecuencias de forma fácil y rápida mediante la computadora.

Para que el sistema funcione de forma adecuada es necesario colocar los selectores tanto del controlador del chopper óptico, como del instrumento virtual desarrollado en la misma escala de frecuencias, ya que existe la posibilidad de cambiar de disco y por lo tanto aumentar o disminuir la frecuencia máxima. El VI desarrollado (Fig. 18) cuenta con un control numérico, en el cual se especifica la frecuencia deseada y esta cambia inmediatamente en el retardador mecánico.

Mediante el chasis y la tarjeta NI 9269 se controla el retardador mecánico y el sistema de posicionamiento nanométrico, gracias a que se cuentan con cuatro canales analógicos independientes y aislados entre sí.



Figura 18. Panel frontal del VI del retardador mecánico.

El diagrama de bloques que se desarrolló para el control del recortador mecánico se muestra en la figura 19, este se encuentra basado en operaciones matemáticas, mediante las cuales se hace la transformación de voltaje a frecuencia, de forma que se comportamiento sea lineal y lo más estable posible, ya que los cambios en frecuencia pueden afectar el filtrado de la señal proveniente de la información física de la muestra, después se envía la señal al recortador mediante el chasis y la tarjeta NI 9269, con la ayuda de un VI exprés de programación, esto se complementa con una compuerta OR y la señal de error.

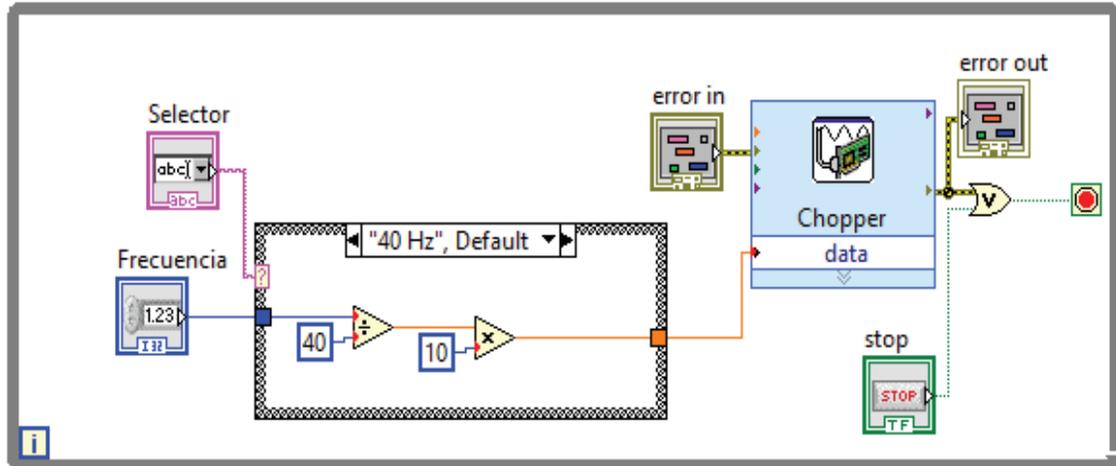


Figura 19. Diagrama de bloques para el control del recortador mecánico.

### 3.7 Mesa de posicionamiento nanométrico NanoCube.

El microscopio de barrido de campo cercano debe de realizar un escaneo de la muestra con pazos de nanómetros, lo cual no se puede realizar mediante sistemas mecánicos, ya que son robustos y el desplazamiento que pueden lograr es de algunos cuantos cientos de nanómetros, lo cual haría que el sistema tuviera una resolución muy pequeña, por lo cual se hace el uso de sistemas basados en cristales piezoeléctricos. El propósito es tener resoluciones menores a las longitudes de onda presentadas por la luz con la cual se ilumina la muestra. Por lo cual se adquirió el sistema P-611.3 NanoCube de mesas de movimiento nanométrico en los ejes coordenados “XYZ” y el E-664 LVPZT servo controlador de posición, ambos de la marca PI.

Ya que el sistema E-664 LVPZT trabaja de -2 a 12 volts, se realizó la calibración del mismo para que trabaje en un rango de 0 a 10 Vcd, y el sistema se desplace de forma lineal, es decir cuando el voltaje de entrada sea de 10 volts el desplazamiento mostrado por el eje correspondiente será de 100 micrómetros, lo cual hace que el movimiento de las mesas se lleve a cabo de forma lineal con respecto al voltaje de entrada suministrado.

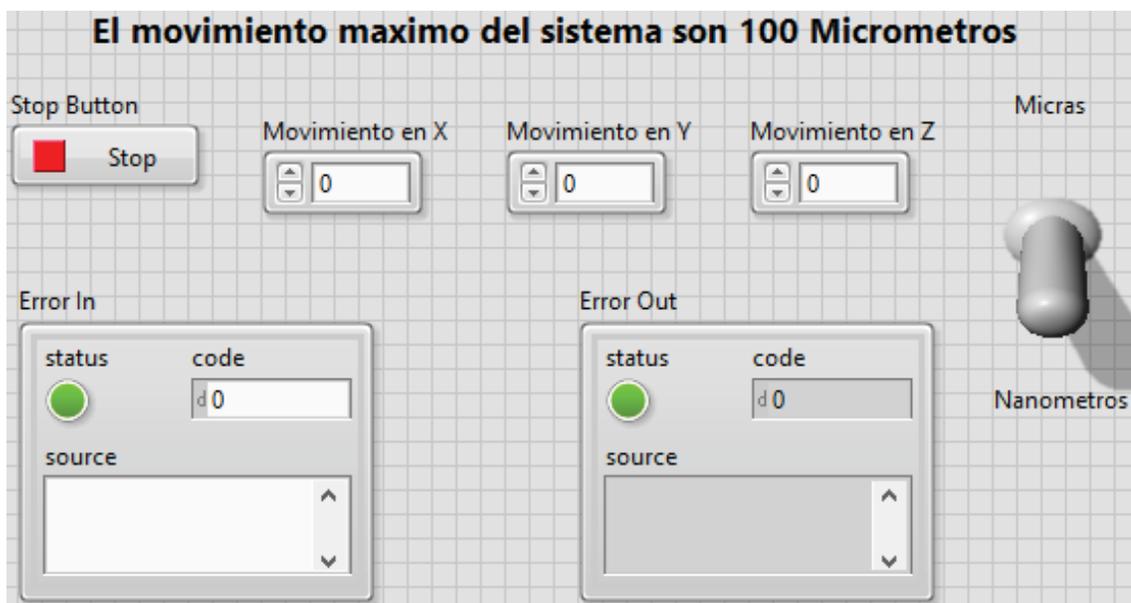


Figura 20. Panel frontal del VI movimiento nanométrico XYZ.



El sistema de mesas de movimiento nanométrico, se automatizo con el software LabVIEW y con la ayuda de la tarjeta de NI 9269 y el chasis cDAQ 9171 de National Instruments, de los cuales ya se había hablado anteriormente, esta tarjeta cuenta con cuatro canales de salidas analógicas independientes que van de 0 a 10 Vcd, por lo cual tres de ellas se utilizan en la automatización de este sistema y la última para el chopper óptico.

El instrumento virtual desarrollado se nombró “movimiento nanométrico XYZ” mostrado en la figura 20, en el cual se encuentran tres controles numéricos, en los cuales se coloca la posición deseada de cada uno de los ejes, también se cuenta con un control booleano, mediante el cual se selecciona si el movimiento estará dado en micrómetros o nanómetros, ya que se trata de un sistema piezoeléctrico la posición que se introduce en los controles es absoluto, es decir si en el control numérico de movimiento en X se introduce el valor de 50 y el selector se encuentra en nanómetros, el desplazamiento realizado por la mesa será de 50 nm.

### 3.8 Cámara CCD.

Para la colocación manual de la punta de fibra óptica se tiene que utilizar una cámara, ya que el ojo humano no puede ver unas cuantas micras de separación entre esta y la muestra, por lo cual podría dañarse la punta, por lo cual se adquirió la cámara CCD de la marca PixeLINK modelo PL-B957F, la cual cuenta con una lente telecéntrica, que es usada para colocar objetivos de aumento como si se tratara de un microscopio, con la finalidad de poder observar que tan separada se encuentra la punta de la fibra óptica estrechada de la muestra que se va a medir. Esta cámara tiene una resolución de 1.4 Megapíxeles <sup>[11]</sup>, la cual se conecta a la computadora mediante el puerto Firewire, con lo cual la velocidad de transmisión de datos es más alta que si se tratara de una cámara con conexión USB, el problema que existe es que este tipo de comunicación no se encuentra presente en todas las computadoras, por lo que se tuvo que usar una tarjeta con comunicación Firewire.

Ya que el software LabVIEW también cuenta con librerías para el manejo de cámaras, se desarrolló un instrumento virtual para el control de esta, además todos los sistemas que se implementaran en el desarrollo del microscopio de barrido de campo cercano deben de controlarse con un solo software.

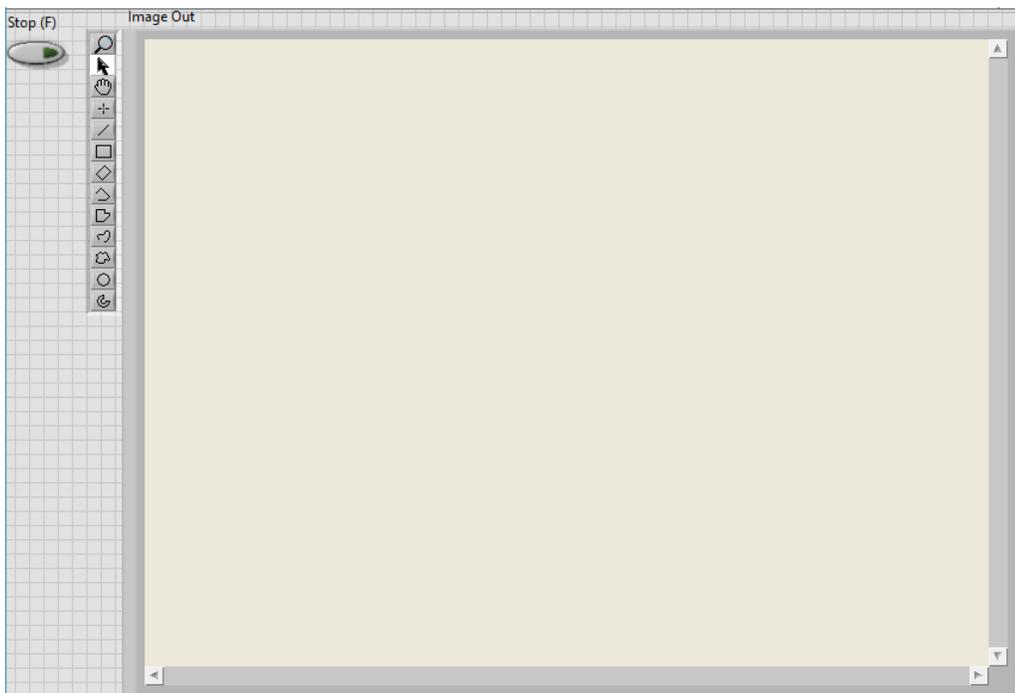


Figura 21. Panel de control de la cámara CCD PixeLINK.



El instrumento virtual desarrollado se nombró “Cámara CCD PixeLink”, el cual tiene la capacidad de adquirir video solo con poner en marcha el VI, del cual se muestra el panel frontal en la figura 21, este cuenta con un icono generado y sus conexiones para poder ser usado dentro de otros programas, esto se puede observar en la esquina superior derecha, además de un botón para detener la adquisición de video, el cual esta encadenado al cable de error, con la finalidad de que en el momento que se llegue a desconectar la cámara el software se detenga de forma automática generando un mensaje de error.

Ya que la cámara cuenta con una lente telecéntrica, esta requiere que la muestra que se va a observar sea iluminada, ya que de no ser así la pantalla solo se verá en color negro, por lo cual se construyó una lámpara de leds ultra brillantes de color blanco, está se encuentra conectada a una fibra óptica que conduce la luz hasta la lente telecéntrica. Esta lámpara se alimenta a 15 volts y consume 40 miliamperes, se desarrolló de esta forma ya que el voltaje de alimentación es el mismo que el de la cámara CCD y por lo tanto se conectan a la misma fuente de alimentación, de haberse realizado de otra forma se necesitarían dos fuentes de voltaje diferentes.

### 3.9 Software de control “Medir AFM y R”

Una vez que se llevó a cabo la automatización de cada uno de los sistemas que conforman el microscopio de contraste en polarización de campo cercano en modo colección desarrollado, se procedió a la programación del software principal de control del sistema, el cual es nombrado “Medir AFM y R”, del cual se muestra su panel frontal en la figura 22, en dicho instrumento virtual solo es necesario introducir los parámetros deseados para la caracterización de la muestra y poner en marcha el instrumento virtual.

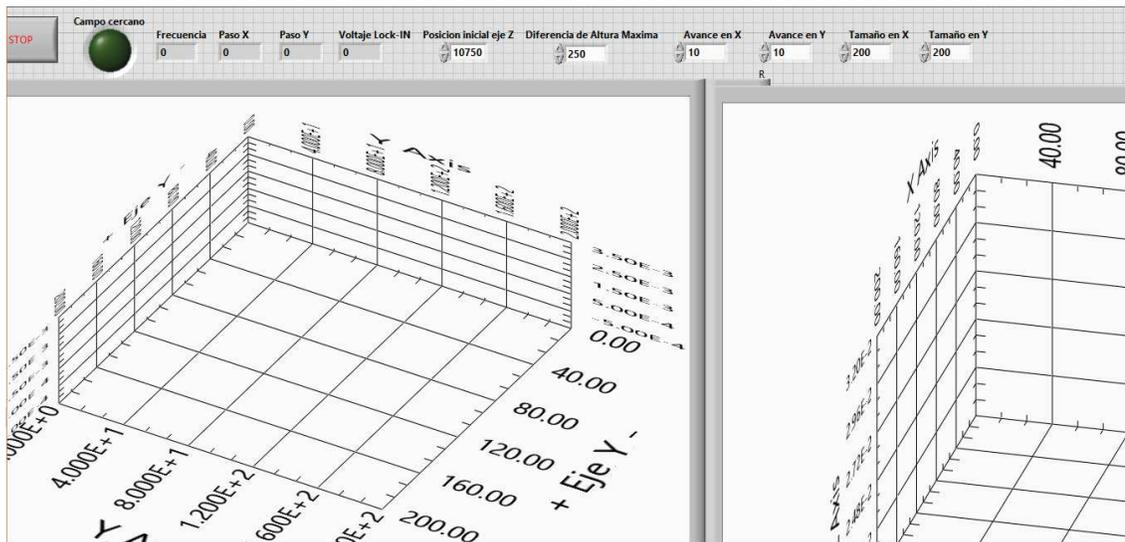


Figura 22. Panel frontal del VI Medir AFM y R.

En este se muestran dos gráficos en tres dimensiones, en los cuales se puede observar en tiempo real la caracterización de las muestras, además aquí se detallan los parámetros para el escaneo de la muestra cómo se detalla a continuación:

- Posición inicial del eje Z: cuando se realiza el acercamiento de la muestra y la sonda, mediante el avance grueso (mesas de desplazamiento micrométricas), solo es posible observar la distancia de separación de la muestra y la punta hasta unas cuantas micras, por lo que al iniciar el funcionamiento del sistema estas aún pueden tener una separación mayor a 5 micras, con lo cual si el tiempo de caracterización será demasiado grande, por lo que se recomienda realizar una medición previa, detener el sistema y declarar una posición inicial en el eje Z de forma que la separación entre



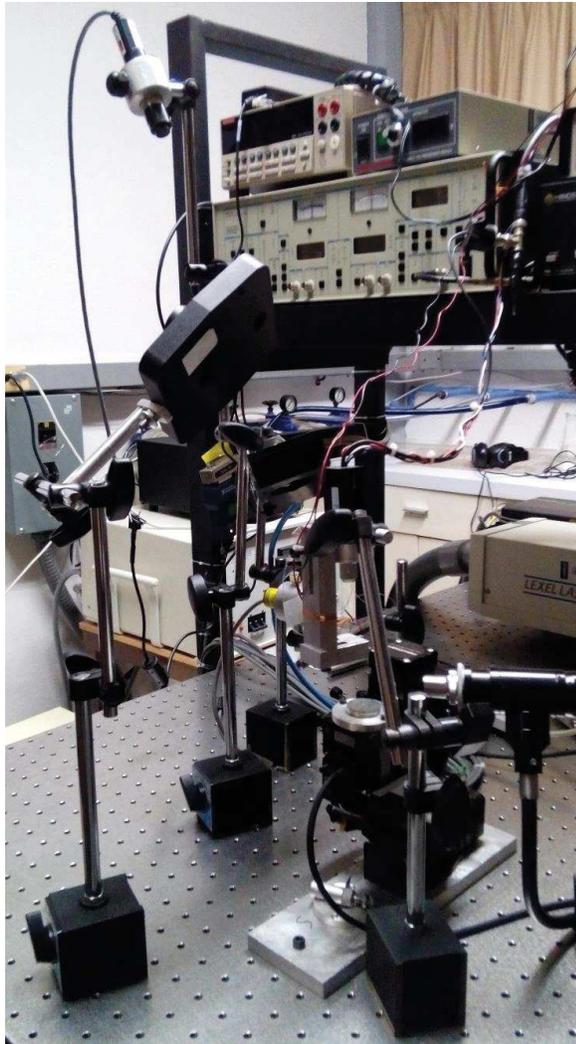
sonda y la muestra sea menor a una micra, con lo cual se disminuye el tiempo de caracterización. Esta distancia está definida en nanómetros.

- Diferencia de altura máxima: este control es utilizado para evitar ruido en las mediciones, provenientes de la vibración causada por corrientes de aire o movimiento accidental de alguno de los componentes del arreglo óptico, por lo que si es conocido el volar de los cambios de altura en la morfología de la muestra, pueden declararse, para cuando exista un cambio que sea muy grande la medición de ese punto en particular pueda ser descartada y realizada nuevamente en forma automática, si la morfología realmente tiene ese cambio la distancia volverá a ser la misma y se tomara como un dato correcto, este control también se define en nanómetros.
- Avance en X: se define la distancia de separación entre cada punto que es escaneado en la muestra en el eje coordenado X, está definido en nanómetros, pero al tratarse de un control de tipo doble puede ser fraccionario el avance declarado, esto es debido a que se trata de un sistema basado en piezoeléctricos con una resolución de 200 angstroms. Hasta el momento la separación mínima utilizada en la caracterización de muestra ha sido de 1nm, ya que la apertura de la punta de fibra óptica que se utiliza es de 100 nm, con lo cual la resolución del sistema no puede ser menor.
- Avance en Y: define la distancia de separación entre cada paso de avance en el eje coordenado Y, al igual que el eje coordenado X se declara en nanómetros. Una de las grandes ventajas que tiene el sistema es que no necesariamente tienen que ser iguales los avances, estos pueden ser totalmente diferentes para realizar algunas caracterizaciones especiales.
- Tamaño en X: se declara el número de puntos que conformaran la matriz del escaneo que se llevara a cabo, mediante este también se determina el área de la muestra que se caracterizara en el eje coordenado X, la distancia puede obtenerse multiplicando el valor declarado aquí por el valor configurado en el avance en X.
- Tamaño en Y: se utiliza para realizar la configuración de la distancia que se caracterizara en el eje coordenado Y, el cual puede tomar valores diferentes a los del control de tamaño en X, solo se pueden declarar datos enteros.

Ajustada la sensibilidad del amplificador, se puede poner en marcha el programa “Medir AFM y R”, al hacerlo comienza su operación de forma automática, no se tiene que declarar el nombre de los archivos donde se guardaran las mediciones, ya que estos se guardan con la fecha en que se realiza la medición, con la terminación de la característica de la cual se trata.

El sistema de microscopia de alta resolución basado en el efecto de campo cercano presentado en este trabajo, permitirá caracterizar la morfología, reflectancia y reflectancia diferencial que presentan diferentes tipos de muestras, y por lo tanto se logran entender los fenómenos que suceden a nivel micrométrico y nanométrico dentro del campo cercano, en un futuro se plantea que este mismo sistema sea utilizado para la realización de nanolitografía o nanograbado en materiales semiconductores (desarrollo de contactos para láseres, etc.), ya que la apertura de la punta de la fibra optica que es utilizada para caracterizar las muestra tiene un diámetro de 100 nm y se adquirirán con diámetros de 50 nm o menores.

Un sistema que se desarrolla para cumplir un cierto número de funciones en específico, puede ser mucho más funcional que uno de tipo comercial, ya que ciertas características se pueden mejorar o aumentar, mediante adaptaciones para que ejecute un mayor número de funciones, esto se observa en el sistema de microscopia desarrollado y presentado en este trabajo, el cual se muestra en la figura 23, en donde se puede observar que la gran mayoría de sus instrumentos que lo componen son móviles, permitiendo realizar diferentes configuraciones y cambios, una de las principales desventajas que se presentan es que el tiempo de alineado de estos instrumentos ópticos que lo conforman toma demasiado tiempo sino se tiene práctica adecuada, al quedar alguno de estos instrumentos desalineados puede causar que las mediciones que se estén llevando a cabo sean erróneas, tengan demasiado ruido y que la señal recogida por la sonda sea demasiado pequeña, por lo tanto se tendrá que realizar nuevamente la alineación.



**Figura 23. Microscopio de contraste en polarización de campo cercano en modo colección desarrollado.**

Las características de funcionamiento del microscopio de barrido de campo cercano desarrollado se muestran a continuación:

- Resolución lateral mostrada: 50 nm.
- Resolución mostrada en Z: 5 nm.
- Área de escaneo: 6.25 cm<sup>2</sup>
- Resolución de las mesas de escaneo: 0.2 nm.
- Longitudes de onda usados: 638, 632.8 y 405 nm.
- Apertura de la sonda: 100 nm.

#### **4. Resultados**

Para comprobar que el proyecto realizado efectivamente cumpla su función, es necesario realizar la verificación de este, mediante la aplicación de diferentes pruebas como repetir la medición varias veces, para ver qué tan precisas son estas.

Todo sistema que se desarrolle con el fin de realizar la caracterización o medición de una magnitud física como temperatura, peso, velocidad, fuerza, distancia, tamaño, etc., es necesario que



se le lleve a cabo un proceso de calibración, con la finalidad de conocer su resolución, exactitud y precisión. Es muy importante tomar en cuenta la diferencia entre estas últimas dos, ya que son términos que comúnmente se confunden, la exactitud se refiere a cuan cerca se encuentra la medición obtenida del valor real, mientras que la precisión es que tan similares o iguales son las mediciones una de otra, realizadas estas bajo las mismas condiciones y la resolución indica la menor variación que puede ser detectada por el sistema.

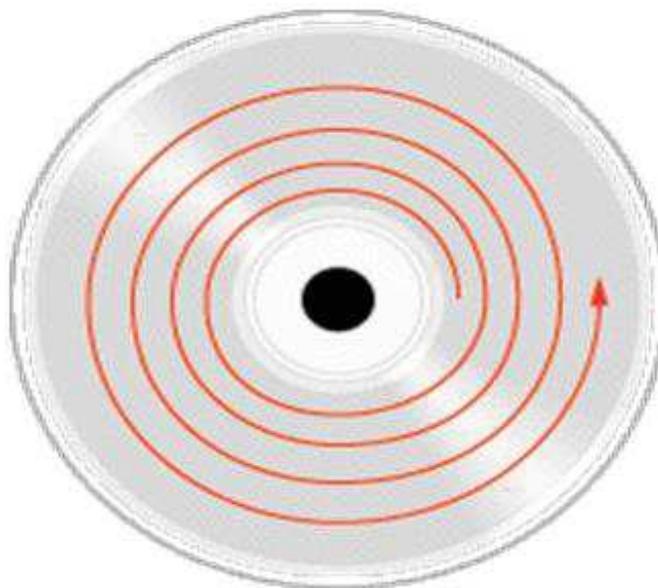
La calibración del sistema del microscopio de barrido basado en el efecto de campo cercano, se llevó a cabo mediante la adquisición de diferentes muestras patrón y su caracterización en el sistema, estas muestras cuentan con una morfología bien definida y caracterizada por el fabricante, por lo cual puede llevarse a cabo una comparación de las características, de lo que se mide en el sistema y lo que físicamente se tiene.

#### **4.1 Caracterización de DVD-ROM**

Los discos compactos contienen sus datos en una única línea en espiral (Fig. 24) que va desde el centro de estos hacia a fuera, con lo cual se ofrecen otros formatos como el mini CD, el cual tiene un diámetro de 8 centímetros y una capacidad de almacenamiento de hasta 200 MB. Esta espiral es equidistante entre sí, la cual si se extendiera alcanzaría una distancia de alrededor de 5 Km, y en ella se encuentran los "BUMPS", la secuencia de ceros y unos que representan los datos que fueron grabados en este, a estos también se les conoce como pits y los cuales aparecen en la parte metalizada del lado donde el láser realiza la lectura.

Para la generación de los pits y grabación de datos en los discos compactos se utiliza un láser de mayor potencia, que el utilizado solo para lectura, ya que este debe ser enfocado sobre la capa de policarbonato generando huecos, los cuales contrastan con las zonas donde no existen, quedando así grabados los datos

Un disco versátil digital (DVD) se desarrolló con la finalidad de reemplazar al formato VHS, ya que el contenido digital en CD's es de menor calidad, además de que el DVD tiene una capacidad de almacenamiento mayor a la de un disco compacto de tamaño estándar (12 centímetros de diámetro), lo cual es debido a que los patrones donde es grabada la información son de un menor tamaño, haciendo que la espiral que se forma sea mucho más compacta y larga, como se puede observar en la figura 25.



**Figura 24. Espiral de datos del disco compacto. [12]**



La medición del disco versátil digital se llevó a cabo con pasos de 10 nm, una altura de separación entre la muestra y la punta de fibra óptica de alrededor de 100 nm y un área total de 0.095  $\mu\text{m}^2$ , los patrones que se presentan son de un menor tamaño, lo cual nos ayudó a demostrar que el sistema tiene la capacidad de resolver estructuras con tamaños menores a 500 nanómetros, como se puede observar en la figura 26, en la que se puede observar una de las pistas de grabación, la cual se encuentra entre dos separadores y que además la medición realizada cuenta con las medidas de la estructura.

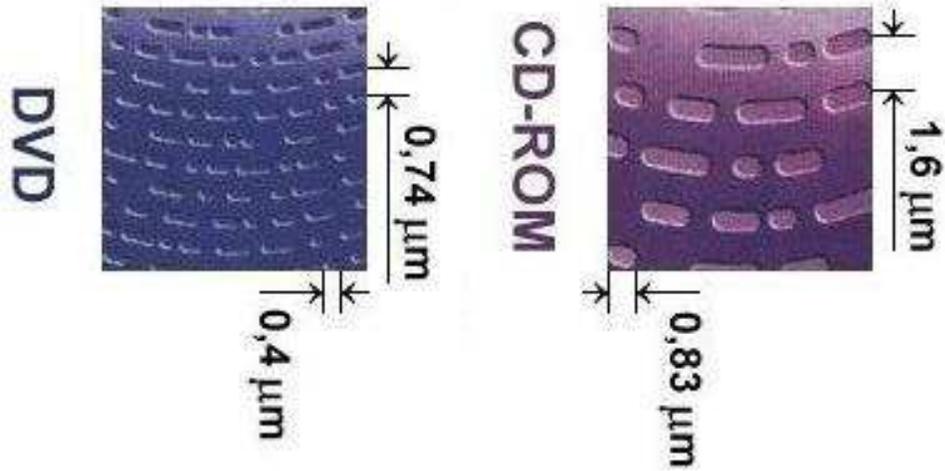


Figura 25. Comparación de patrones de la estructura de un CD y DVD. [13]

En la figura 25 se puede observar que la pista caracterizada en esta medición tiene un ancho de 450 nm, y que aún se puede resolver ciertos patrones dentro de esta, lo que nos indica que el sistema desarrollado cuenta con una mayor resolución, por lo cual se procedió a la caracterización de un disco Blu-ray.

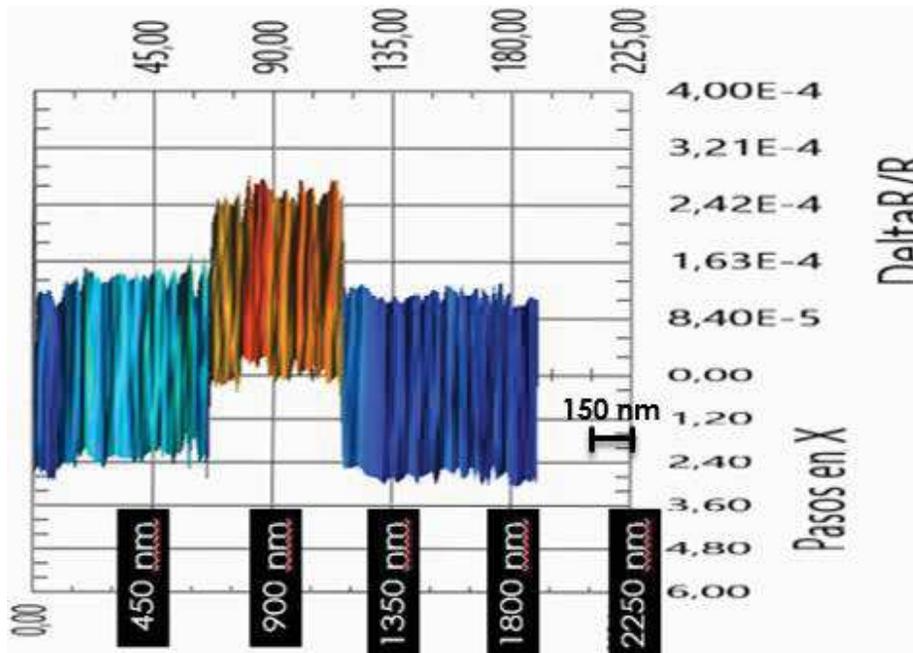


Figura 26. Imagen del DVD vista 3D, pasos 10 nm.

#### 4.2 Caracterización de Blu-ray

En la búsqueda de patrones bien establecidos y caracterizados, para la realización de la calibración y pruebas de funcionamiento del sistema de microscopía, se observó que los discos Blu-ray, tienen una capacidad de almacenamiento de datos mayor a la de los discos compactos y los DVD, debido a que cuentan con una mayor densidad de espiras. El Blu-ray fue desarrollado por la Asociación del Disco Blu-ray (BDA), principalmente para ser empleado en datos de video de alta definición (HD) y lanzado en el año 2002, el cual tiene una capacidad de almacenamiento que va desde los 25 GB hasta los 128 GB. [14]

Los lectores de discos Blu-ray usan un láser con una longitud de onda de 405 nanómetros, sin embargo para la caracterización de este sistema se usó una longitud de onda 632.8 nm, aun siendo esta mucho mayor que el tamaño de las pistas que muestra la estructura de un Blu-ray, con lo cual se puede comprobar que el sistema no depende de la longitud de onda, con la cual se ilumine la muestra que se mide, sino más bien del diámetro de la apertura de la punta de fibra óptica y del sistema de posicionamiento, el cual pueda colocar a esta en campo cercano.

Para la realización de esta medición la distancia entre pasos para el escaneo fue de 10 nm, la separación entre la muestra y la punta de fibra óptica de alrededor de 100 nm, el área que se escaneo de 0.036  $\mu\text{m}^2$  y se mide reflectancia diferencial, con lo cual se obtuvo el resultado mostrado en la figura 23, en donde se muestra una de las pistas del disco Blu-ray y dos separadores, con lo cual se puede comprobar que el sistema cuenta con una mayor resolución.

Como se puede observar en la figura 27, se encuentra una pista y un separador bien identificados en la estructura, por lo que se concluye que el sistema cuenta con la capacidad de resolver estructuras con tamaños menores a los 200 nanómetros, que además no depende de la longitud de onda con la cual es iluminada la muestra, aun cuando esta y la punta se encuentran en campo lejano, debido a que la capa protectora del Blu-ray, no permite acercar la punta a unos cuantos nanómetros de las pistas. Los parámetros obtenidos son consistentes con los que el fabricante ya ha caracterizado en sus pruebas de calidad.

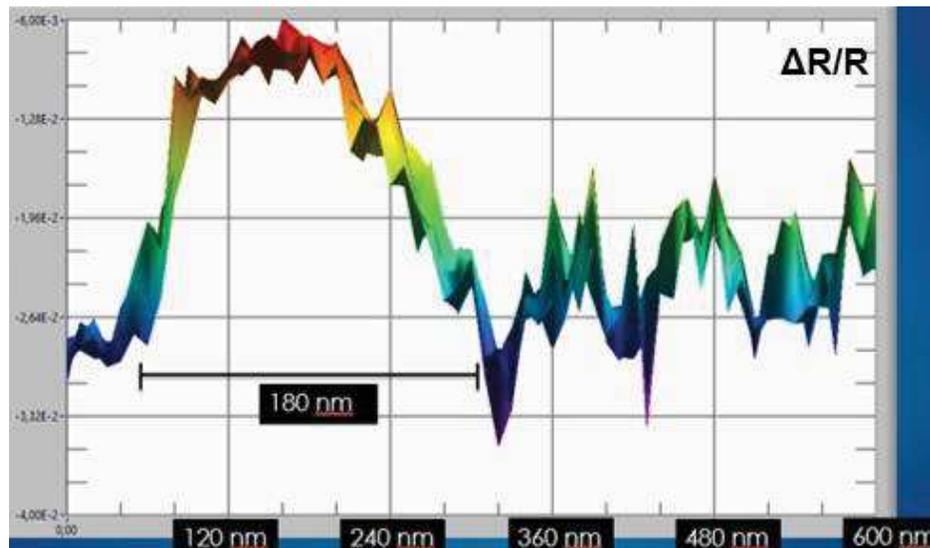


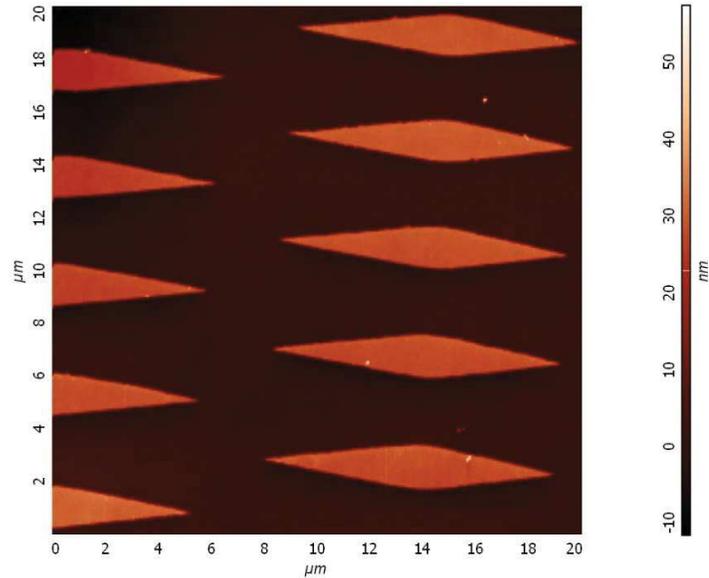
Figura 27. Imagen del disco Blu-ray en vista lateral, pasos 10 nm.

#### 4.3 Caracterización de muestra patrón SNG-01

Como ya se mencionó anteriormente es necesario realizar la calibración del sistema, instalado sobre la mesa óptica flotada dentro del laboratorio, ya que con esto se comprueba el correcto funcionamiento del microscopio, por lo que se adquirió la muestra patrón SNG-01 de NT-MDT, la cual



está basada en un sustrato de cuarzo, a la que se le realizó un crecimiento de rombos de vanadio, en estos dos materiales existe una gran diferencia en su índice de refracción (cuarzo=1.544, vanadio=3.7836), mediante lo cual se obtendrá una mayor diferencia en la reflectividad y por lo tanto un mayor contraste durante el escaneo realizado con el sistema. De la muestra adquirida, su fabricante reporta la siguiente imagen (Fig. 28) generada mediante el barrido con un microscopio de fuerza atómica.



**Figura 28.** Imagen de la estructura de la muestra patrón SNG-01, obtenida por medio de AFM. <sup>[15]</sup>

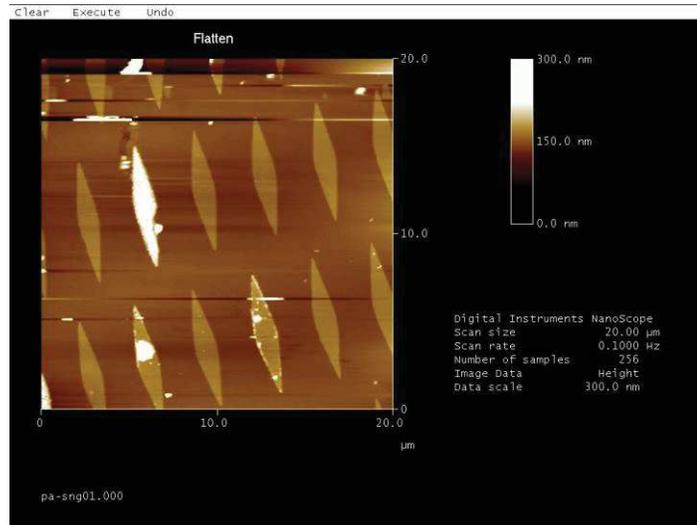
Para observar la muestra patrón de forma rápida y verificar que no haya sido dañada en el traslado, esta fue medida con el microscopio metalográfico que se encuentra en el instituto obteniendo las imágenes mostradas a continuación.



**Figura 29.** Muestra patrón vista con objetivo 50X.



En la figura 30 se puede observar un patrón de formas muy regular, que se distribuyen a lo largo de la superficie, pero también se confirma que tiene algunos lugares que podrían estar dañados por el manejo de la muestra en su traslado. Después de haber observado la muestra patrón SNG-01 en el microscopio metalográfico, se procedió a realizar la medición de esta en el microscopio de fuerza atómica (AFM), con ayuda del Doctor Jorge Ortega, con la finalidad de corroborar que las medidas nominales que se dan son las reales, y además poder verificar si existen los daños observados mediante el microscopio metalográfico.



**Figura 30. Medición de muestra patrón con AFM.**

En la figura 30 se puede observar que hay lugares de la muestra que no se encuentran dañados, por lo tanto existen áreas que son aptas para la calibración del sistema de microscopia de alta resolución basado en el efecto de campo cercano, sin embargo se puede observar que hay pits que se encuentran por arriba de la altura especificada por el fabricante (entre 20 y 30 nm)

Las alturas promedio se encuentran 20 y 30 nanómetros mientras que algunas de ellas sobresalen y llegan a medir más de 100 nanómetros, toda esta información es de utilidad para la realización de la calibración del sistema desarrollado, mediante la realización del escaneo de la muestra. Para las primeras mediciones efectuadas se existe un incremento en los pasos de 500 nanómetros y una altura de separación entre la muestra y la punta de fibra óptica de alrededor de 100 nm, con lo cual el sistema se encuentra en campo cercano, por lo que aun la resolución es pequeña, pero con esta se puede observar el patrón existente en la muestra.

En la figura 31 se observa la vista aérea de los resultados de reflectancia diferencial obtenidos por medio del escaneo de la muestra SNG-01, con el sistema de microscopia de alta resolución basado en el efecto de campo cercano, en la cual claramente se puede observar la distribución de los pits de forma diagonal, ya que la muestra no se alinea de alguna forma en específico para su medición, el área que es muestreada en este experimento es de 60x75 micrómetros, por lo cual se pueden apreciar algunos áreas con desprendimiento de los rombos de vanadio que fueron depositados, lo cual concuerda con lo observado por el microscopio metalográfico y los resultados obtenidos en AFM, también se pueden observar las diferentes alturas que presentan los patrones.

Este experimento se llevó a cabo varias veces con la finalidad de comprobar la precisión y exactitud del sistema de microscopia desarrollado, obteniendo como resultado, que las mediciones realizadas presentan reproducibilidad, es decir al realizar la comparación entre los resultados que se obtienen, estos presentan muy pocas diferencias entre sí. Se realizaron pruebas con diferentes

incrementos en los pasos con que se lleva a cabo el escaneo, con la finalidad de conocer la resolución máxima que se puede tener con el sistema de microscopia.

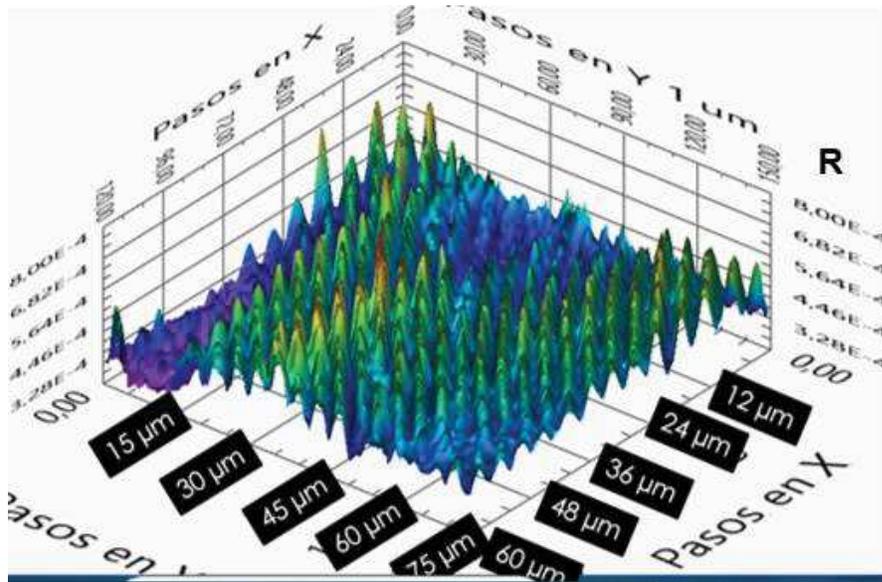


Figura 31. Vista lateral de la muestra patrón medida del sistema.

Por lo que a continuación se muestra en la figura 32, una de las mediciones realizadas mediante el sistema de microscopia desarrollado, focalizada en la punta de uno de los rombos, con un incremento en los pasos para el escaneo de 50 nm y una altura de separación entre la muestra y la punta de alrededor de 100 nm.

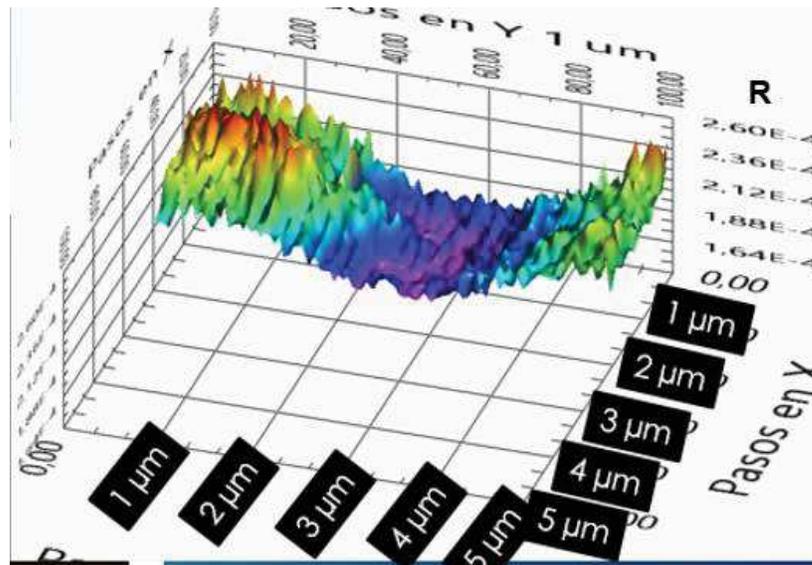


Figura 32. Vista lateral de la punta de un rombo.

De la figura anteriores se puede observar claramente la punta de uno de los pits, que tiene la forma de un rombo y que con ello la resolución del sistema en el eje “X” y “Y”, es de alrededor de 150 nanómetros, mientras que para el eje Z la resolución vista hasta el momento es de 20 nanómetros, lo cual concuerda con los datos que el fabricante de esta muestra entrega.

Como siguiente paso en la calibración del sistema desarrollado, se le mide reflectancia diferencial a la muestra patrón, lo cual se lleva a cabo haciendo incidir un haz láser polarizado y modulado sobre la muestra, esto se logra colocando un modulador fotoelástico antes de que el haz ilumine la muestra, y tomando la diferencia entre los valores medidos por el multímetro y el amplificador Lock-In, con la finalidad de medir la diferencia entre la polarización “S” y “P”, ya que de esta forma se obtiene un mayor contraste y por lo tanto una mejor imagen de la morfología que presenta el patrón.

En las figura 33 se observa el resultado obtenidos después de haber realizado el escaneo de la muestra, en modo de reflectancia diferencial. El área caracterizada en esta prueba es de 20x12 micrómetros, por lo tanto se puede observar por completo uno de los rombos de vanadio. En la configuración utilizada para realizar esta medición se obtiene una mejor imagen de la morfología de la muestra patrón, que en la que solo se mide la reflectancia, ya que existe un mayor contraste, además cabe mencionar que el escaneo se llevó a cabo con un incremento entre los pasos de 100 nm y una distancia de separación entre la muestra y la punta de fibra óptica de alrededor de 100 nm.

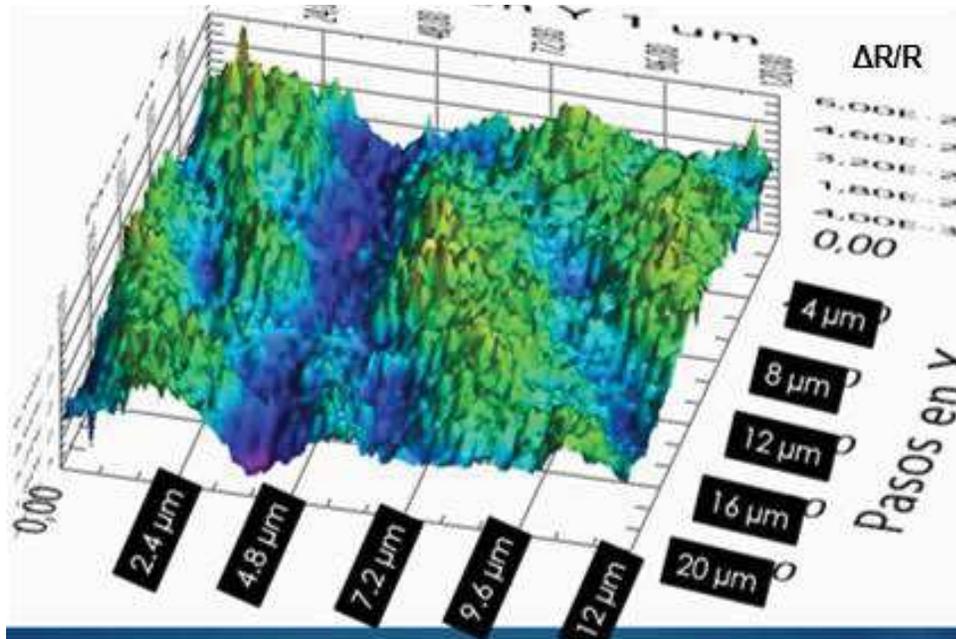


Figura 33. Vista aérea de la medición realizada mediante reflectancia diferencial.

Con las caracterizaciones realizadas se concluye que el sistema funciona de forma correcta, en las mediciones de reflectancia y reflectancia diferencial, ya que los parámetros se encuentran conforme a lo que el fabricante de las muestras reporta.

#### 4.4 Rejilla de difracción de 1200 líneas por milímetro.

Una rejilla de difracción es un componente óptico, que cuenta con un patrón regular, la cual divide (difracta) la luz en varios haces que viajan en diferentes direcciones, y que se utiliza para la separación de los colores de la luz incidente. Esta puede generarse mediante el método de exposición holográfica, mediante el cual se consigue que existan muy pocos errores en la periodicidad del patrón que presentan. Como ya se ha mencionado, el sistema de microscopía de alta resolución basado en el efecto de campo cercano, se calibro mediante el uso de muestras comerciales que cuentan con patrones conocidos y bien caracterizados, por lo que las rejillas de difracción son una buena opción para la calibración del sistema ya que cuenta con los patrones mostrados en la figura 34.



Figura 34. Patrones simétricos de tipo senoidal, que muestra la rejilla de difracción.

Las rejillas de difracción, se fabrican en tamaños estándar de 600, 1200, 1800 y 3600 líneas por milímetro, por lo que el patrón presente en estas se repite cada  $1.66 \mu\text{m}$ ,  $833 \text{ nm}$ ,  $555 \text{ nm}$  y  $277 \text{ nm}$  respectivamente. La rejilla de difracción a analizar para la calibración del sistema fue la de 1200 líneas por milímetro, de la cual se realizaron mediciones tanto de reflectancia como reflectancia diferencial, el resultado obtenido del escaneo de la rejilla por medio de reflectancia se muestra en la figura 35.

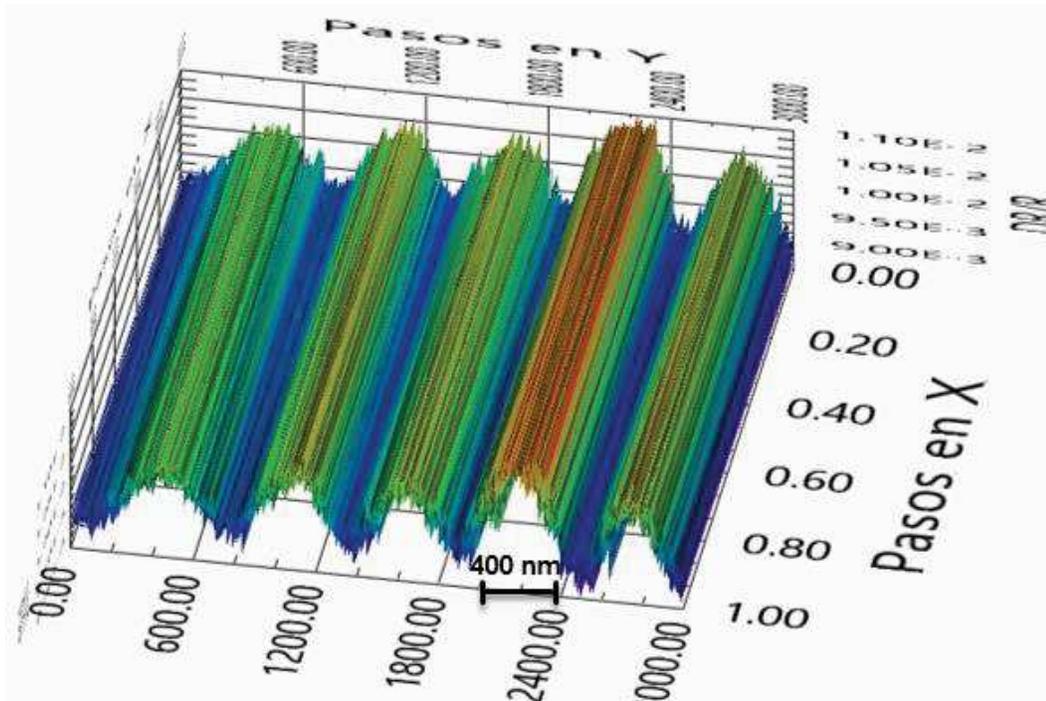


Figura 35. Vista aérea de la rejilla de difracción 1200 líneas por milímetro.

Para la realización de esta medición la distancia de separación entre los pasos mediante los cuales se llevó a cabo el escaneo fue de  $1 \text{ nm}$ , la longitud escaneada de  $3 \text{ micras}$ , por lo que se puede observar la formación de varios ciclos. La gráfica obtenida de la medición realizada, muestra que el patrón presente en la rejilla de difracción se repite continuamente, teniendo una longitud de alrededor de  $800 \text{ nm}$ , lo cual cumple con lo esperado y verificando nuevamente que el sistema desarrollado se encuentra trabajando de forma correcta.

#### 4.5 Defectos estructurales generados en GaAs mediante ataque químico.

El Arseniuro de galio (GaAs) es un compuesto formado por galio y arsénico el cual cuenta con propiedades semiconductoras, por lo cual se utiliza para la fabricación de dispositivos electrónicos tales como: diodos emisores de luz infrarroja, diodos laser, circuitos integrados, celdas fotovoltaicas, etcétera, que trabajan a frecuencias de microondas. El ancho de su banda prohibida es mayor que en el silicio y el germanio, por lo cual la movilidad de sus electrones también es mayor y la de los hueco

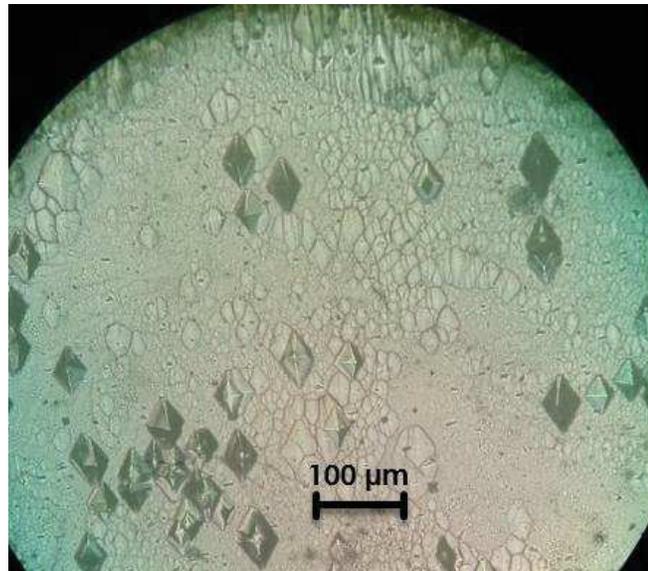


muy similar a los del silicio [16], también se sabe que los electrones en arseniuro de galio se aceleran a mayores velocidades, por lo cual tardan un menor tiempo en cruzar el canal de un transistor.

El GaAs aparte de tener propiedades semiconductoras, también es utilizado en la óptica para la realización de lentes y espejos traseros en sistemas de laser de CO<sub>2</sub> de media y alta potencia, ya que presenta dureza y durabilidad en entornos con polvo o partículas abrasivas y el cual presenta una estructura cristalina. Investigadores descubrieron y estudiaron el movimiento ultrarrápido de los electrones en los cristales de arseniuro de galio, el cual se encontraba expuesto por un corto tiempo a un campo eléctrico de gran intensidad. Donde se mostró por primera vez un movimiento oscilatorio colectivo de los electrones a una frecuencia muy alta, este descubrimiento puede desempeñar un papel muy importante en la miniaturización de dispositivos electrónicos. [17]

Al realizar un ataque químico con hidróxido de potasio (KOH) a estructuras de GaAs con orientación (100), se graban deformaciones o agujeros también llamados pits, esto es debido a que no existe una buena unión entre los átomos, por lo que existe un rompimiento en sus enlaces. Los pits que se generan tienen la forma de pirámides con base de rombos alargados, en donde su tamaño depende del tiempo de exposición en la solución de KOH, la temperatura a la cual se encuentre esta y la concentración de la misma. Este tipo de solución no es muy comúnmente usada para realizar el grabado de pits en GaAs, ya que su acción es más lenta que en el silicio y para acelerarla se tiene que aumentar la temperatura a más de 350 °C, por lo que generalmente se utilizan soluciones de ácidos.

Para la fabricación de pits en muestras de obleas de arseniuro de galio orientación (100), se utilizó una solución de KOH con una saturación del 45% a una temperatura aproximada de 80 °C, ya que el control de temperatura del horno no funciona, por lo cual esta se controló de forma manual, los pits generados en el laboratorio de química se muestran en la figura 36.



**Figura 36. Pits generados en GaAs conductor orientación (100), duración del ataque 70 minutos.**

Ya que se había comprobado el correcto funcionamiento del microscopio desarrollado en la caracterización tanto de reflectancia como de reflectancia diferencial, este tipo de muestra se utilizó para verificar el correcto funcionamiento del sistema en su configuración de microscopio de fuerza atómica (AFM), por lo cual los resultados de la siguiente medición mostrada (Fig. 37), el eje Z está dado en nanómetros, ya que los mecanismos de posicionamiento, permiten realizar un acercamiento de la muestra y la punta con avances de hasta 0.2 nm. Para esta medición estos tienen una separación 5 nanómetros, al ser cada vez menores estos, el tiempo en que se lleva a cabo la medición es mayor, pero como ventaja se obtiene una mayor resolución de la muestra que se está

midiendo. Por lo tanto se podrán observar detalles de mucho menor tamaño que se encuentren presentes en las muestras, la limitación que se tiene es el diámetro de la punta de fibra óptica al igual que el tamaño de los cantilévers en el microscopio de fuerza atómica.

En la figura 37 se puede observar que se midió un pit completo, el cual conserva la forma de pirámide con base de rombo alargado, con lo cual se puede verificar el correcto funcionamiento del microscopio desarrollado, en su configuración de AFM. Los defectos estructurales son hoyos que se forman en la muestra, sin embargo observados mediante el microscopio metalográfico se aprecian como montes, por lo cual realizando la comparación entre las figuras 36 y 37 se observara una inversión óptica en la forma de los defectos.

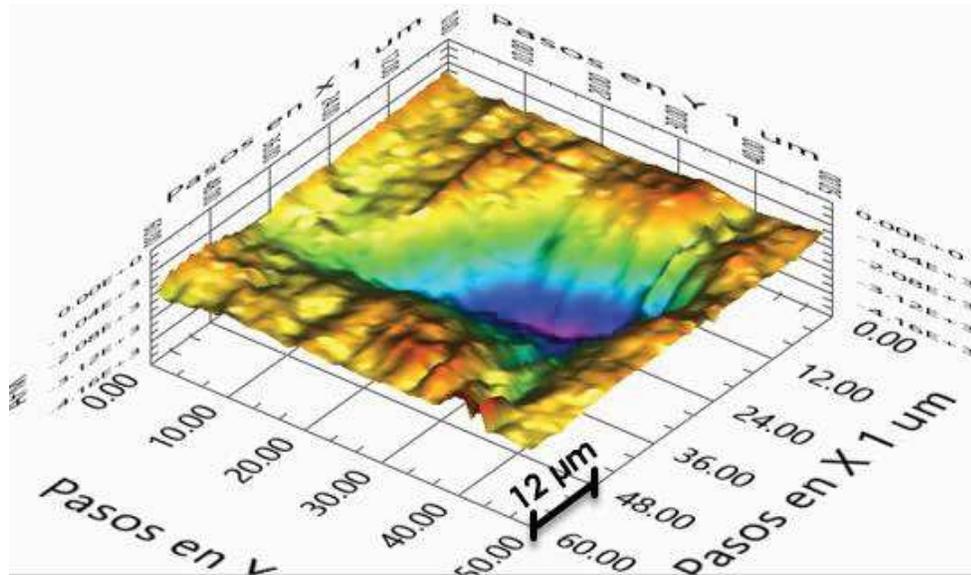


Figura 37. Vista en aérea de la medición como AFM de un pits completo generados en GaAs orientación (100).

## 5. Conclusiones

Es importante el desarrollo de sistemas ópticos de medición y caracterización, mediante los cuales se logre romper el límite de resolución de los microscopios ópticos convencionales y que además no dependan del límite de difracción. El sistema de microscopia de alta resolución basado en el efecto de campo cercano presentado en este trabajo, permitirá caracterizar la morfología, reflectancia y reflectancia diferencial que presentan diferentes tipos de muestras, y por lo tanto se logran entender los fenómenos que suceden a nivel micrométrico y nanométrico dentro del campo cercano de las muestras estudiadas.

El microscopio de barrido de campo cercano desarrollado y presentado en este trabajo de tesis, muestra las siguientes ventajas en relación a sistemas ya existentes:

- La resolución no depende de la longitud de onda que se utiliza para la iluminación de la muestra, sino más bien del diámetro de la apertura de la punta de fibra óptica que se utiliza y del sistema de posicionamiento para realizar el escaneo.
- La medición se lleva a cabo en tiempo real, es decir cada punto que es medido, este es graficado inmediatamente, lo que permite observar si realmente el área que se está caracterizando es de interés, en caso de no ser así no será necesario esperar a que termine la medición para detenerla y cambiar de área, ocasionando una pérdida significativa de tiempo.



- Los datos son representados en graficas 3 D, donde se pueden interpretar de una forma más práctica y además observar a detalle las características de las muestras medidas. Estas graficas pueden ser manipuladas al mismo tiempo en que se está llevando a cabo la medición.
- El sistema cuenta con la capacidad de realizar la caracterización de la morfología, la reflectancia y la reflectancia diferencial al mismo tiempo, lo que nos permite realizar una comparación entre estas, realizando un análisis más profundo de las muestras que se analizan, permitiendo entender los fenómenos que se presentan.
- Ya que los datos obtenidos de las mediciones necesitan ser analizados en más de una ocasión estos son guardados en matrices, dentro de archivos de texto, los cuales son nombrados con la fecha en la cual se lleva a cabo la medición y con el prefijo al final de la característica analizada, debido al tipo de archivo en que son almacenados los datos, estos pueden ser reconstruidos mediante los siguientes programas: LabVIEW, Excel, Wolfram Mathematica, Origin y Matlab.
- Para aumentar la resolución del sistema de microscopia desarrollado, solo es necesario utilizar puntas de fibra óptica con una apertura de un menor diámetro, puesto que el sistema de escaneo con que se cuenta tiene la capacidad de generar desplazamientos de hasta 0.2 nanómetros, de igual forma si la punta es optimizada para un cierto rango de longitudes de onda, se puede medir con diferentes tipos de láser.
- El área que el sistema puede caracterizar es de 6.25 cm<sup>2</sup>, la cual es mucho mayor a la que presentan sistemas comerciales, esto se debe a que el sistema de escaneo nanométrico, se encuentra montado sobre un sistema micrométrico, los cuales se complementan para medir una mayor área.
- Para mejorar la calidad de las mediciones realizadas, solo es necesario aumentar el número de promedios por punto que se toman, esto se verá reflejado en el aumento de tiempo en que se realiza la medición, sin embargo si se desea realizar una medición rápida para saber si esta se realiza en un área de interés solo será necesario disminuir el número de promedios por punto, de esta forma también disminuye el tiempo empleado en realizar la caracterización.
- Debido a que todos los componentes del sistema fueron automatizados mediante el software LabVIEW, y por lo tanto se les desarrollo un instrumento virtual de forma individual, no es necesario el uso de ningún otro software de control diferente al desarrollado para que el sistema de microscopia desarrollado funciones de manera correcta.
- Las muestras que serán caracterizadas en el microscopio de barrido de campo cercano no necesitan una preparación previa, es decir no es necesario que se encuentren al vacío o se les dé un tratamiento especial, por lo cual solo es necesario que se coloquen en el portamuestras y el sistema se ponga a funcionar para que estas sean medidas.
- Una de las ventajas más importantes que tiene el sistema de microscopia de alta resolución basado en el efecto de campo cercano, es que la punta de fibra óptica se encuentra vibrando a una frecuencia determinada, mientras la muestra se acerca de forma automática mediante el sistema piezoeléctrico, esta frecuencia es captada mediante un detector y en el momento que esta cambia, el sistema deja de acercar la muestra a la punta, esto es debido a que en el campo cercano se encuentran presentes fuerzas electrostáticas, las cuales interactúan con la punta de fibra óptica cambiando la frecuencia, por lo cual la muestra y la punta nunca llegan a entrar en contacto, evitando que estas lleguen a dañarse.
- El sistema cuenta con dos tipos de portamuestras, por lo cual estas se pueden caracterizar de forma horizontal como lo realizan la mayoría de los sistemas comerciales y de forma vertical, la cual nos permite conocer el espesor de los materiales que conforman la muestra que se caracteriza.
- El láser se encuentra montado sobre una base magnética, al igual que la cabeza del modulador fotoelástico y el cabezal del chopper óptico, con lo cual se puede cambiar el ángulo al cual se hace incidir el haz laser sobre la muestra, ya que si estas absorben el haz laser con que son iluminadas, se puede cambiar este por uno de mayor o menor longitud de onda sin tener que realizar ningún otro tipo de modificaciones al sistema de microscopia desarrollado.



- La longitud de onda del láser con la cual se ilumina la muestra puede variarse, actualmente se ha medido con tres láseres distintos cuyas longitudes de onda son 638, 632.8 y 405 nm, con lo cual se puede caracterizar un mayor número de muestras.
- El sistema trabaja con luz polarizada, lo que permite medir reflectancia diferencial, con lo cual se mejora la resolución del sistema debido a que se obtiene una diferencia entre las polarizaciones “S” y “P”, obteniéndose mejores contrastes de la morfología que presenta la muestra.

Un sistema que se desarrolla para cumplir un cierto número de funciones en específico, puede ser mucho más funcional que uno de tipo comercial, ya que ciertas características se pueden mejorar o aumentar, mediante adaptaciones para que ejecute un mayor número de funciones, esto se observa en el sistema de microscopía desarrollado y presentado en este trabajo, la gran mayoría de los instrumentos que lo componen son móviles, permitiendo realizar diferentes configuraciones y cambios.

Una de las principales desventajas que se presentan es que el tiempo de alineado de estos instrumentos ópticos que lo conforman toma demasiado tiempo sino se tiene práctica adecuada, al quedar alguno de estos instrumentos desalineados puede causar que las mediciones que se estén llevando a cabo sean erróneas, tengan demasiado ruido y que la señal recogida por la sonda sea demasiado pequeña, por lo tanto se tendrá que realizar nuevamente la alineación.

Ya que se trata de un desarrollo, que parte desde cero fue muy importante haber realizado la medición de muestras patrón, las cuales muestran características que se encuentran muy bien definidas y estandarizadas por el fabricante, de tal forma que se puede conocer si el microscopio de barrido de campo cercano se encuentra funcionando de forma correcta y cuáles son las limitaciones que este presenta, además el repetir más de una vez la misma medición bajo las mismas condiciones ayuda a conocer la precisión del sistema.

## Referencias

- [1] Microscopio óptico, EcuRed, conocimiento con todos y para todos, obtenido el 2 de septiembre del 2016.  
[https://www.ecured.cu/Microscopio\\_%C3%B3ptico](https://www.ecured.cu/Microscopio_%C3%B3ptico)
- [2] Daniel J. Narváz Armas, LA MICROSCOPIA: HERRAMIENTA PARA ESTUDIAR CÉLULAS Y TEJIDOS, MONOWEB, obtenido el 30 agosto del 2016.  
[http://www.medic.ula.ve/histologia/anexos/microscopweb/MONOWEB/capitulo3\\_4.html](http://www.medic.ula.ve/histologia/anexos/microscopweb/MONOWEB/capitulo3_4.html)
- [3] El microscopio óptico. Observación microscopía de los organismos, Universidad Politécnica de Valencia, obtenido el 2 de septiembre del 2016.  
<http://www.euita.upv.es/varios/biologia/Pr%C3%A1cticas/Pr%C3%A1ctica%201.pdf>
- [4] NT-MDT, Scanning Near-Field Microscopy (SNOM) - Principles and Modes of Operation by NT-MDT, AZO NANO, obtenido el 25 de Enero del 2016.  
<http://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=2250>
- [5] Three types of NSOM scanning modes, ResearchGate, obtenido el 27 de noviembre del 2016.  
[https://www.researchgate.net/figure/215691608\\_fig1\\_Figure-5-Three-types-ofNSOM-scanning-modes-The-thick-arrow-represents-illumination-of](https://www.researchgate.net/figure/215691608_fig1_Figure-5-Three-types-ofNSOM-scanning-modes-The-thick-arrow-represents-illumination-of)
- [6] “Near-field microscopy techniques”, Yannick DE WILDE, Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielles Paris, nMRIconference July 12, 2010
- [7] LabVIEW, National instruments, obtenido el 5 de Septiembre del 2016.  
<http://www.ni.com/es-mx.html>
- [8] Adrien Jolly, LabVIEW, TestStand, LabWindows/CVI, obtenido el 5 de Septiembre del 2016.  
<http://www.ajolly.com.mx/es/desarrollo-consulta-sistema-supervisor-controlprueba-medida/19-LabVIEW-que-es.html>
- [9] Software de Desarrollo de Sistemas NI LabVIEW, National instruments, obtenido el 5 de Septiembre del 2016.  
<http://www.ni.com/labview/esa/>
- [10] ¿Qué puede hacer con LabVIEW?, National instruments, obtenido el 6 de Septiembre del 2016.  
<http://www.ni.com/labview/why/esa/>



- [11] FireWire CCD Industrial Camera -- PL-B957F, engineering 360, Powered by IEEE GlobalSpec, obtenido el 10 de Septiembre del 2013.  
<http://datasheets.globalspec.com/ds/2646/PixeLINK/75E01453-0D9E-47C7-BB90681B1B3499AA>
- [12] Fulgencio Tapia, Dispositivos de almacenamiento, slideplayer, obtenido el 9 de Octubre del 2016.  
<http://player.slideplayer.es/12/3782912/#>
- [13] Alfredo Gallinger, Los discos DVD (Digital Versatile Disc), Informática Argentó, obtenido el 28 de Octubre del 2016.  
<http://argentows.blogspot.mx/2011/06/los-discos-dvd-digital-versatile-disc.html>
- [14] En el 31 cumpleaños del CD, un repaso a su evolución hasta el Blu-ray, Francis (th) E mule Science's News, obtenido el 1 de Noviembre del 2016.  
<https://francisthemulenews.wordpress.com/2013/09/02/en-el-31-cumpleanos-delcd-un-repaso-a-su-evolucion-hasta-el-blu-ray/>
- [15] Test Grating For Scanning Near Field Optical Microscope, NT-MDT Molecular Devices and Tools for Nanotechnology, obtenido el 20 de Septiembre del 2016.  
[http://nanoprobes.aist-nt.com/images/samples/Snom\\_test\\_1.jpg](http://nanoprobes.aist-nt.com/images/samples/Snom_test_1.jpg)
- [16] Arseniuro de galio, EcuRed, conocimiento con todos y para todos, obtenido el 14 de Noviembre del 2016.  
[https://www.ecured.cu/Arseniuro\\_de\\_galio](https://www.ecured.cu/Arseniuro_de_galio)
- [17] El descubrimiento de nuevas propiedades de algunos cristales podría tener consecuencias en la miniaturización en electrónica, Electrónica Semiconductores GaAs, obtenido el 17 de Noviembre del 2016.  
<http://www.um.es/docencia/barzana/DIVULGACION/ELECTRONICA/Nuevaspropiedades-GaAs.html>



# Desarrollo de un sistema computacional para robot paralelo utilizando simulación cooperativa

Jiménez López Eusebio<sup>1</sup>, Fierro Ruiz Kevin<sup>2</sup>, López Martínez Aldo Augusto<sup>3</sup>, Rivera Nieblas Jorge Oswaldo<sup>4</sup>, Delfín Vázquez Juan José<sup>5</sup>.

<sup>1</sup>Universidad La Salle Noroeste - CIAAM UTS - IIMM.

<sup>2</sup>Universidad La Salle Noroeste.

<sup>3</sup>Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI).

<sup>4</sup>Universidad Tecnológica de Hermosillo, Sonora -Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Hermosillo.

<sup>5</sup>Instituto Tecnológico Superior de Cajeme.

## Resumen

*Este artículo presenta el desarrollo de un sistema computacional para el control de un robot paralelo plano de 3GDL utilizando simulación compartida o co-simulación. Los softwares utilizados en la co-simulación fueron: 1) Matlab, 2) Labview y 3) SolidWorks. El modelo cinemático de posicionamiento del robot paralelo fue generado utilizando el álgebra de los números complejos. El modelo resultante, relacionado con el problema inverso, generó un sistema de 12 ecuaciones no lineales con 12 incógnitas del tipo polinomial, el cual fue resuelto mediante el método de Newton-Raphson. El modelo algebraico y numérico del robot se programó en la plataforma de cálculo formal Matlab. En el software Labview se desarrolló una HMI (Human Machine Interface) del robot bajo el enfoque productor-consumidor. Esta interface lee información del programa del Matlab y simula gráficamente el movimiento del robot, y tiene agregadas funciones para enlazar diferentes tarjetas electrónicas de la serie arduino. Las geometrías sólidas del robot se dibujaron en el software SolidWorks. El modelo en sólidos del robot es alimentado por medio de una interface con Labview y Solid Motion. Se desarrolló un prototipo del robot paralelo sobre el cual se hicieron las pruebas pertinentes. La co-simulación es un enfoque de la computación que permite potenciar el diseño de sistemas mecatrónicos, como es el caso del robot paralelo motivo de estudio.*

**Palabras clave:** Simulación compartida, co-simulación, robot paralelo, HMI.

## 1. Introducción

La co-simulación o simulación cooperativa, es una metodología aplicada a la simulación, que permite a componentes individuales ser simulados con diferentes herramientas ejecutándose al mismo tiempo e intercambiando información de forma colaborativa [1]. O bien, una co-simulación se define como la simulación coordinada de N sub- modelos que forman juntos un modelo integral de un sistema integral correspondiente, de tal manera que la co-simulación se comporta lo más cerca posible de una simulación hipotética del modelo integral por un simulador hipotético capaz de simular el sistema integral [2].

La co-simulación permite integrar modelos heterogéneos a partir de diferentes simuladores, típicamente de diferentes dominios tales como sistemas mecánicos y redes. Los modelos combinados pueden interactuar entre sí durante la simulación mediante un mecanismo de interconexión. Los entornos de co-simulación intentan llenar el vacío en las herramientas de modelado existentes y superar la falta de modelos detallados de las redes de computación y comunicación. Esto permite usar modelos establecidos sin tener que re-implementarlos en otros simuladores [3]. Los entornos de co-simulación pueden requerir alguna forma de interacción entre los modelos. Para dar un ejemplo, considere la realización de una simulación de un conjunto de robots en red. En un simulador robótico



se pueden utilizar, tanto sus modelos robóticos como el controlador, y un simulador de red se puede usar para simular la propia red. Para realizar la simulación se requeriría de la construcción de modelos que representen a los robots en el simulador robótico. En el simulador de red se tendría que construir un conjunto de nodos de red para cada robot con el fin de representar la capacidad de red de cada robot [3].

Existen diversos ejemplos de aplicaciones de la co-simulación. Por ejemplo en [4] se utilizan los softwares ADAMS y Matlab para construir un simulador y un control de un robot de 2 GDL. Otra aplicación de la co-simulación entre ADAMS y Matlab se presenta en [5], en donde se simula y controla el movimiento de un robot móvil de cuatro piernas impulsadas por actuadores hidráulicos. En [6] se presenta una co-simulación entre ADAMS y Matlab para la simulación y control de un robot paralelo. En [7] se presenta un método basado en co-simulación de un sistema mecatrónico el cual es capaz de optimizar los parámetros de control de un sistema de plataforma estabilizado inercialmente de dos ejes aplicado a un dirigible no tripulado. En dicho trabajo utilizaron SolidWorks, ADAMS y Matlab para desarrollar el sistema.

En este artículo se presenta un sistema computacional capaz de manejar y controlar los movimientos de un robot paralelo plano de 3 GDL. Para el desarrollo de dicho sistema fueron utilizados los softwares SolidWorks, Matlab y Labview. El modelo cinemático de posicionamiento del robot fue desarrollado con el álgebra hipercompleja (números complejos) [8].

## 2. Características del robot paralelo y modelado.

El robot paralelo motivo de estudio en este artículo es tipo RRR plano de 3 GDL, como se muestra en la Figura 2.1. Dicho robot consta de tres cadenas cinemáticas independientes movidas por un servomotor y dos plataformas: una fija (la triangular) y otra móvil (la circular) [9]. Cada cadena tiene relacionados tres eslabones (fabricados de aluminio comercial) y la intersección de las cadenas es la base móvil. Sobre el disco se localiza un agujero el cual representa el punto terminal del robot (pot) y en donde se coloca una herramienta de trabajo.

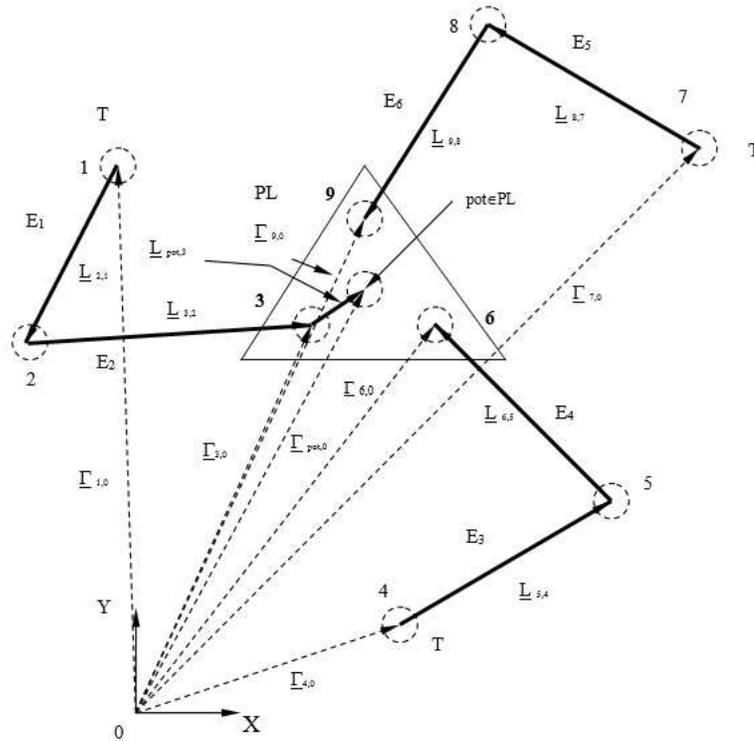


Figura 2.1 Robot paralelo plano

Por otro lado, el modelado del robot se realizó con números complejos [8]. La Figura 2.2 muestra la configuración analítica del robot [10]. Para poder modelar las rotaciones del robot fue necesario definir las operaciones de suma y multiplicación por complejos [8]. Esto es:

Las operaciones  $\oplus : \mathfrak{R}^2 \times \mathfrak{R}^2 \rightarrow \mathfrak{R}^2$  y  $\otimes : \mathfrak{R}^2 \times \mathfrak{R}^2 \rightarrow \mathfrak{R}^2$  se definen de la manera siguiente:

$$\begin{aligned} \text{i) } \{a, b\} \oplus \{\alpha, \beta\} &= \{a + \alpha, b + \beta\} \\ \text{ii) } \{a, b\} \otimes \{\alpha, \beta\} &= \{a\alpha - b\beta, a\beta + b\alpha\}, \quad \forall \{a, b\}, \{\alpha, \beta\} \in \mathfrak{R}^2 \end{aligned} \quad (1)$$



**Figura 2.2. Configuración de análisis del robot.**

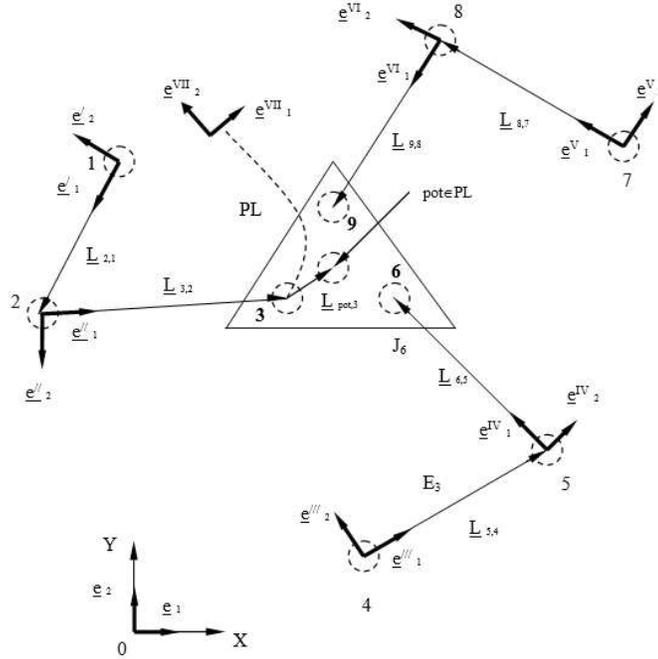
De acuerdo con la Figura anterior, las ecuaciones de lazo se definen desde el origen de coordenadas y hacia cada punto de conexión entre la plataforma móvil y los eslabones conducidos. Las expresiones de lazo son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 1) \quad \underline{\Gamma}_{3,0} &= \underline{\Gamma}_{1,0} \oplus \underline{L}_{2,1} \oplus \underline{L}_{3,2} & (2) \\
 2) \quad \underline{\Gamma}_{6,0} &= \underline{\Gamma}_{4,0} \oplus \underline{L}_{5,4} \oplus \underline{L}_{6,5} \\
 3) \quad \underline{\Gamma}_{9,0} &= \underline{\Gamma}_{7,0} \oplus \underline{L}_{8,7} \oplus \underline{L}_{9,8}
 \end{aligned}$$

Para relacionar el centroide de la plataforma pot (extremo final del órgano terminal) se utilizan las relaciones siguientes [10]:

$$\begin{aligned}
 1) \quad \underline{\Gamma}_{3,0} &= (\underline{\Gamma}_{3,0,X}, \underline{\Gamma}_{3,0,Y}) = (X_{pot_0} - l_{pot} \cos \theta_7, Y_{pot_0} - l_{pot} \sin \theta_7) & (3) \\
 2) \quad \underline{\Gamma}_{6,0} &= (\underline{\Gamma}_{6,0,X}, \underline{\Gamma}_{6,0,Y}) = (\underline{\Gamma}_{3,0,X} + l_{3,6} \cos (\theta_7 - \varphi_{PL}), \\
 & \quad \underline{\Gamma}_{3,0,Y} + l_{3,6} \sin (\theta_7 - \varphi_{PL})) \\
 3) \quad \underline{\Gamma}_{9,0} &= (\underline{\Gamma}_{9,0,X}, \underline{\Gamma}_{9,0,Y}) = (\underline{\Gamma}_{3,0,X} + l_{3,9} \cos (\theta_7 + \varphi_{PL}), \\
 & \quad \underline{\Gamma}_{3,0,Y} + l_{3,9} \sin (\theta_7 + \varphi_{PL}))
 \end{aligned}$$

Aquí,  $X_{pot_0}$  y  $Y_{pot_0}$  representan las coordenadas del punto localizado en el centroide del órgano terminal,  $l_{pot}$ ,  $l_{3,6}$ ,  $l_{3,9}$  son las dimensiones medidas sobre la plataforma móvil,  $\theta_7$  y  $\varphi_{PL}$  son los ángulos medidos: 1) del eje X a la plataforma (variable) y 2) de la arista de la plataforma a la línea del  $l_{pot}$  (siempre fijo). Para poder modelar el movimiento de los eslabones, se asocian sistemas móviles a cada uno de los eslabones que componen al robot, como se muestra en la Figura 2.3.



**Figura 2.3. Sistemas locales móviles.**

Las ecuaciones de lazo se escriben en función de las bases móviles de la manera siguiente:

$$\begin{aligned}
 1) \quad \underline{\Gamma}_{3,0} &= \underline{\Gamma}_{1,0} \oplus l_{2,1} \bullet \underline{e}_1^I \oplus l_{3,2} \bullet \underline{e}_1^{II} & (4) \\
 2) \quad \underline{\Gamma}_{6,0} &= \underline{\Gamma}_{4,0} \oplus l_{5,4} \bullet \underline{e}_1^{III} \oplus l_{6,5} \bullet \underline{e}_1^{IV} \\
 3) \quad \underline{\Gamma}_{9,0} &= \underline{\Gamma}_{7,0} \oplus l_{8,7} \bullet \underline{e}_1^V \oplus l_{9,8} \bullet \underline{e}_1^{VI}
 \end{aligned}$$

Las bases locales móviles se escriben en términos de la función de rotación  $\rho : \mathfrak{R}^2 \rightarrow \mathfrak{R}^2$  definida en [8]. Esto es:

$$\rho(p, q) = \frac{1}{\|p\|} \bullet p \otimes q; \quad q \in \mathfrak{R}^2 \text{ fijo}, \quad (5)$$

Por lo que: (6)

$$\begin{aligned}
 1) \quad \underline{e}_1^I &= \rho(p, \underline{e}_1) = p \otimes \underline{e}_1; \quad 2) \quad \underline{e}_1^{II} = \rho(q, \underline{e}_1) = q \otimes \underline{e}_1; \quad 3) \quad \underline{e}_1^{III} = \rho(r, \underline{e}_1) = r \otimes \underline{e}_1 \\
 4) \quad \underline{e}_1^{IV} &= \rho(s, \underline{e}_1) = s \otimes \underline{e}_1; \quad 5) \quad \underline{e}_1^V = \rho(t, \underline{e}_1) = t \otimes \underline{e}_1; \quad 6) \quad \underline{e}_1^{VI} = \rho(u, \underline{e}_1) = u \otimes \underline{e}_1 \\
 7) \quad \underline{e}_1^{VII} &= \rho(v, \underline{e}_1) = v \otimes \underline{e}_1
 \end{aligned}$$

Aquí,  $p, q, r, s, t, u, v \in \mathfrak{R}^2$  son números complejos de norma unitaria. Por tanto, las ecuaciones de lazo (4) se pueden escribir en términos de la base inercial de la manera siguiente:

$$\begin{aligned}
 1) \quad \underline{\Gamma}_{3,0} &= \underline{\Gamma}_{1,0} \oplus l_{2,1} \bullet \{p \otimes \underline{e}_1\} \oplus l_{3,2} \bullet \{q \otimes \underline{e}_1\} & (7) \\
 2) \quad \underline{\Gamma}_{6,0} &= \underline{\Gamma}_{4,0} \oplus l_{5,4} \bullet \{r \otimes \underline{e}_1\} \oplus l_{6,5} \bullet \{s \otimes \underline{e}_1\} \\
 3) \quad \underline{\Gamma}_{9,0} &= \underline{\Gamma}_{7,0} \oplus l_{8,7} \bullet \{t \otimes \underline{e}_1\} \oplus l_{9,8} \bullet \{u \otimes \underline{e}_1\}
 \end{aligned}$$



Las ecuaciones de norma unitaria son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 1) \quad p &= \{p_0, p_1\}; p_0 \in \mathcal{R} \text{ y } p_1 \in \mathcal{R}; & \|p\| &= 1; p_0^2 + p_1^2 = 1 & (8) \\
 2) \quad q &= \{q_0, q_1\}; q_0 \in \mathcal{R} \text{ y } q_1 \in \mathcal{R}; & \|q\| &= 1; q_0^2 + q_1^2 = 1 \\
 3) \quad r &= \{r_0, r_1\}; r_0 \in \mathcal{R} \text{ y } r_1 \in \mathcal{R}; & \|r\| &= 1; r_0^2 + r_1^2 = 1 \\
 4) \quad s &= \{s_0, s_1\}; s_0 \in \mathcal{R} \text{ y } s_1 \in \mathcal{R}; & \|s\| &= 1; s_0^2 + s_1^2 = 1 \\
 5) \quad t &= \{t_0, t_1\}; t_0 \in \mathcal{R} \text{ y } t_1 \in \mathcal{R}; & \|t\| &= 1; t_0^2 + t_1^2 = 1 \\
 6) \quad u &= \{u_0, u_1\}; u_0 \in \mathcal{R} \text{ y } u_1 \in \mathcal{R}; & \|u\| &= 1; u_0^2 + u_1^2 = 1 \\
 7) \quad v &= \{v_0, v_1\}; v_0 \in \mathcal{R} \text{ y } v_1 \in \mathcal{R}; & \|v\| &= 1; v_0^2 + v_1^2 = 1
 \end{aligned}$$

Las relaciones geométricas entre los componentes de los complejos y las rotaciones son:

$$\begin{aligned}
 1) \quad p &= \{p_0, p_1\}; p_0 = \text{Cos } \theta_1; p_1 = \pm \text{Sen } \theta_1, & 2) \quad q &= \{q_0, q_1\}; q_0 = \text{Cos } \theta_2; q_1 = \pm \text{Sen } \theta_2 & (9) \\
 3) \quad r &= \{r_0, r_1\}; r_0 = \text{Cos } \theta_3; r_1 = \pm \text{Sen } \theta_3, & 4) \quad s &= \{s_0, s_1\}; s_0 = \text{Cos } \theta_4; s_1 = \pm \text{Sen } \theta_4 \\
 5) \quad t &= \{t_0, t_1\}; t_0 = \text{Cos } \theta_5; t_1 = \pm \text{Sen } \theta_5, & 6) \quad u &= \{u_0, u_1\}; u_0 = \text{Cos } \theta_6; u_1 = \pm \text{Sen } \theta_6 \\
 7) \quad v &= \{v_0, v_1\}; v_0 = \text{Cos } \theta_7; v_1 = \pm \text{Sen } \theta_7
 \end{aligned}$$

Aquí,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7 \in \mathcal{R}$  son los desplazamientos angulares de los eslabones que componen al robot relativos al eje X y los ejes de rotación están caracterizados por el signo “ $\pm$ ” y en la dirección del eje Z. La Figura 2.4 muestra las componentes de las rotaciones.

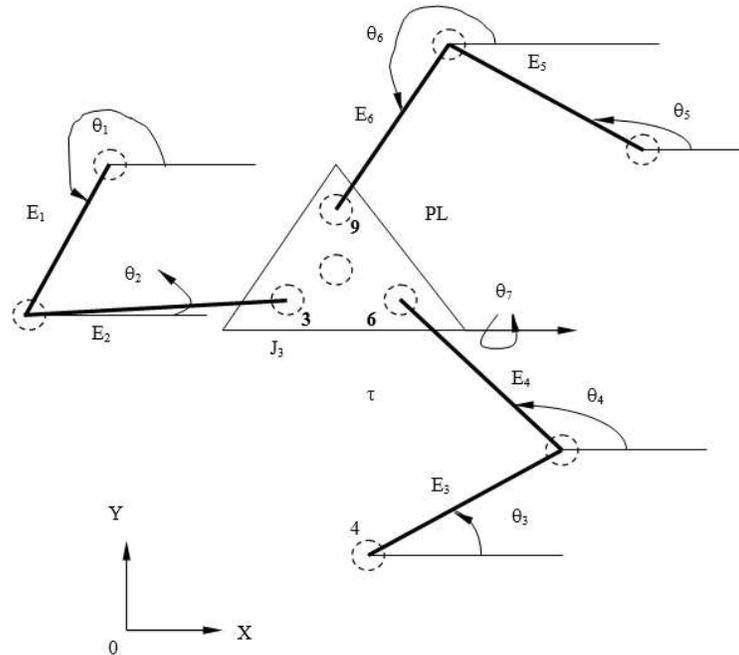


Figura 2.4 Desplazamientos angulares de los eslabones



## 2.1 Formulación del problema cinemático inverso en la configuración no deformada

En esta sección se formula el problema cinemático inverso relacionado con el robot motivo de estudio en este artículo. Dicho problema está asociado con la configuración de referencia mostrada en la Figura 2.1 [10].

“Dados  $\Gamma_{3,0}, \Gamma_{6,0}, \Gamma_{9,0} \in \mathcal{R}^2$ ,  $\Gamma_{1,0}, \Gamma_{4,0}, \Gamma_{7,0} \in \mathcal{R}^2$ ,  $\Gamma_{pot,0} \in \mathcal{R}^2$ ,  $v = \{v_0, v_1\}$ ,  $\|v\| = 1$ ,  $l_{2,1}, l_{3,2}, l_{5,4}, l_{6,5}, l_{8,7}, l_{9,8}, l_{pot,3}, l_{3,6}, l_{3,9} \in \mathcal{R}$ , encuentre:  $p = \{p_0, p_1\}$ ,  $q = \{q_0, q_1\}$ ,  $r = \{r_0, r_1\}$ ,  $s = \{s_0, s_1\}$ ,  $t = \{t_0, t_1\}$ ,  $u = \{u_0, u_1\}$ , tal que las expresiones (7) sean satisfechas y,

$$\begin{aligned} p_0^2 + p_1^2 = 1 & \quad ; & q_0^2 + q_1^2 = 1 \\ r_0^2 + r_1^2 = 1 & \quad ; & s_0^2 + s_1^2 = 1 \\ t_0^2 + t_1^2 = 1 & \quad ; & u_0^2 + u_1^2 = 1 \end{aligned}$$

El problema de la cinemática inversa genera 12 ecuaciones algebraicas no lineales con 12 incógnitas del tipo polinomial.

## 3. Desarrollo computacional.

El modelo matemático del robot, desarrollado en la parte 2 de este artículo, es el centro del sistema mecatrónico, pues al resolverlo proporcionará los parámetros necesarios para controlar al robot y para desarrollar el sistema computacional, razón por la cual se realizó el modelado en la configuración de referencia. La Figura 3.1 muestra el sistema computacional relacionado con el robot motivo de estudio.

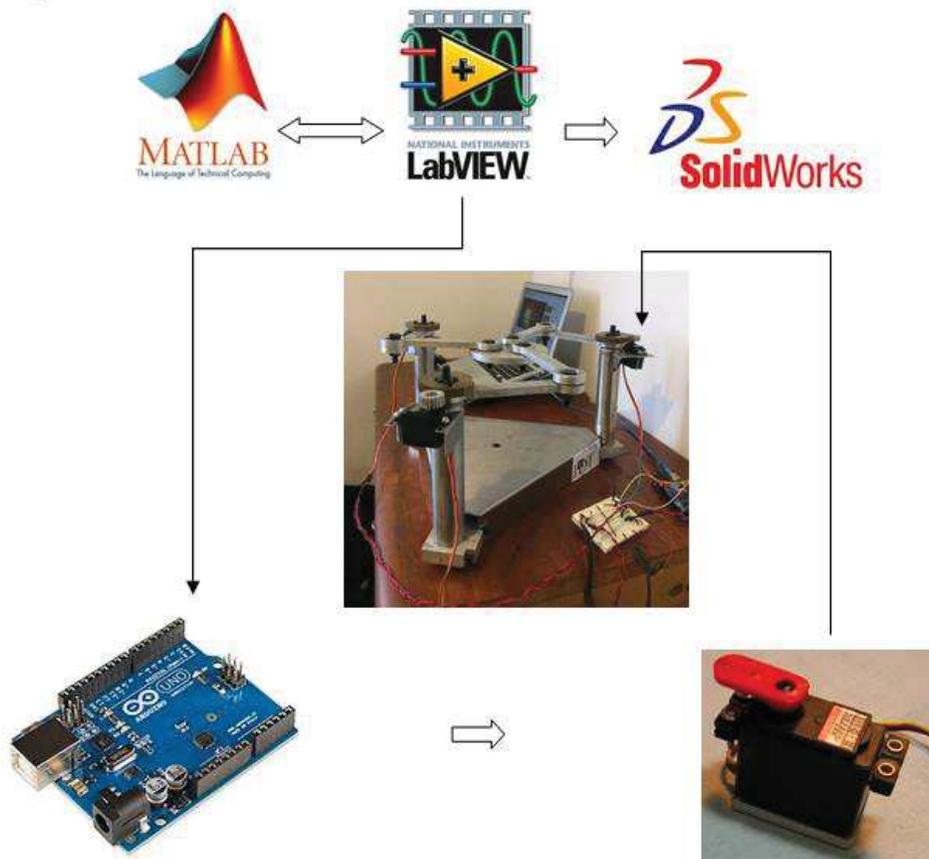


Figura 3.1 Elementos que componen el sistema computacional y control del robot.



El modelo matemático relacionado con el robot en estudio es no lineal, por lo que fue necesario utilizar el método de Newton-Rapshon para resolverlo [10]. El modelo numérico fue programado en MatLab. Posteriormente, en Labview se desarrolló una interfaz gráfica del robot (ver Figura 3.2) y se relacionó mediante un VI al modelo numérico realizado en MatLab. Por consiguiente, Matlab le proporciona a Labview los ángulos y los ejes con que giran los eslabones del robot según la cinemática inversa. Los datos cinemáticos del robot son enviados a la tarjeta arduino y esta a su vez envía la información a los servomotores que mueven el robot, según la información de entrada.

Cabe mencionar que, a pesar de que el software Matlab tiene diversas herramientas de apoyo como Simulink y para el diseño de HMI (Human Machine Interface), y que puede ser utilizado como software de referencia dentro del sistema global de co-simulación, se decidió considerar al software Labview como referencia central, pues la principal idea fue la de probar la eficacia y eficiencia dicho paquete, además que ya se contaba con experiencia en la co-simulación Labview-Matlab y Labview-SolidWorks.

El robot fue dibujado en modelado de sólidos en el software SolidWorks y fue activado con Solid Motion. Para mover virtualmente el robot en Solidworks se integró a la interfaz de Labview un módulo de interconexión a la HMI. Las siguientes consideraciones fueron tomadas en cuenta para el diseño de la HMI:

- 1) El diseño conceptual de la estructura del prototipo, para que la HMI reúna el conjunto de características y delimitaciones propuestas.
- 2) El diseño del modelo matemático basado en el concepto del prototipo sustentado en teorías que satisfagan el movimiento plano.
- 3) El diseño de la interfaz de control VI que genera la sinergia entre un conjunto de softwares para su uso multidisciplinario.
- 4) La manufactura del prototipo físico que corresponda fundamentalmente con cada una de las diferentes condiciones que inicialmente se han dado para el diseño conceptual.
- 5) La implementación de modelo matemático dentro de la simulación del diseño virtual y movimiento físico que represente su patrón de comportamiento similar.
- 6) Ajustes de diseño y programación en cada una de las observaciones que a medida del avance se vayan requiriendo ponerles atención (modificación, cambio o eliminación).
- 7) Implementación dentro de un área de trabajo específica.

La HMI mostrada en la Figura 3.2 corresponde al panel de control de Labview del robot y permite la sinergia entre los respectivos softwares utilizados y su manipulación. La numeración siguiente indica las funciones de la HMI:

1. Control de la ubicación independiente en el plano X,Y, y Alpha
2. Control la trayectoria del robot dentro de una secuencia de hasta 5 filas con su respectivo accionador.
3. Control del número de filas a ejecutar dentro de la trayectoria desde la primera hasta la quinta fila.
4. Indicadores de grados en motores virtuales que corresponden a la simulación que son los grados de cada uno de los eslabones con respecto al origen (p, s, u, q, t, v), así como en motores físicos controlados por Arduino que presentan una compensación basada en el punto control de la simulación y su respectivo grado de calibración.
5. Botón Home que retorna al robot a su posición por defecto al inicializar la simulación que corresponde a X=23, Y=23 y Alph=0.
6. Timer que determina el tiempo de ejecución de cada iteración dentro de la recta de movimiento del robot para que de este modo se pueden observar distintos eventos relacionados con las señales y efectos mecánicos.
7. Selección de placa Arduino que se desea utilizar.
8. Selector de puerto serial de control del Microcontrolador (Arduino).

9. Calibración de motores por medio de la tarjeta Arduino para ingresar un punto de referencia de trabajo como su respectiva compensación con el modelo matemático.
10. Perillas de control para Solidworks que permiten generar el movimiento en el software CAD.
11. Sensores de control para Solidworks que muestran si los movimientos se han realizado o no.
12. Accionadores de movimiento para Solidworks en forma de botones.
13. Simulador virtual dentro de Labview donde se despliega de manera gráfica la simulación que se asemeja al prototipo.
14. Botón de paro de emergencia para la simulación.

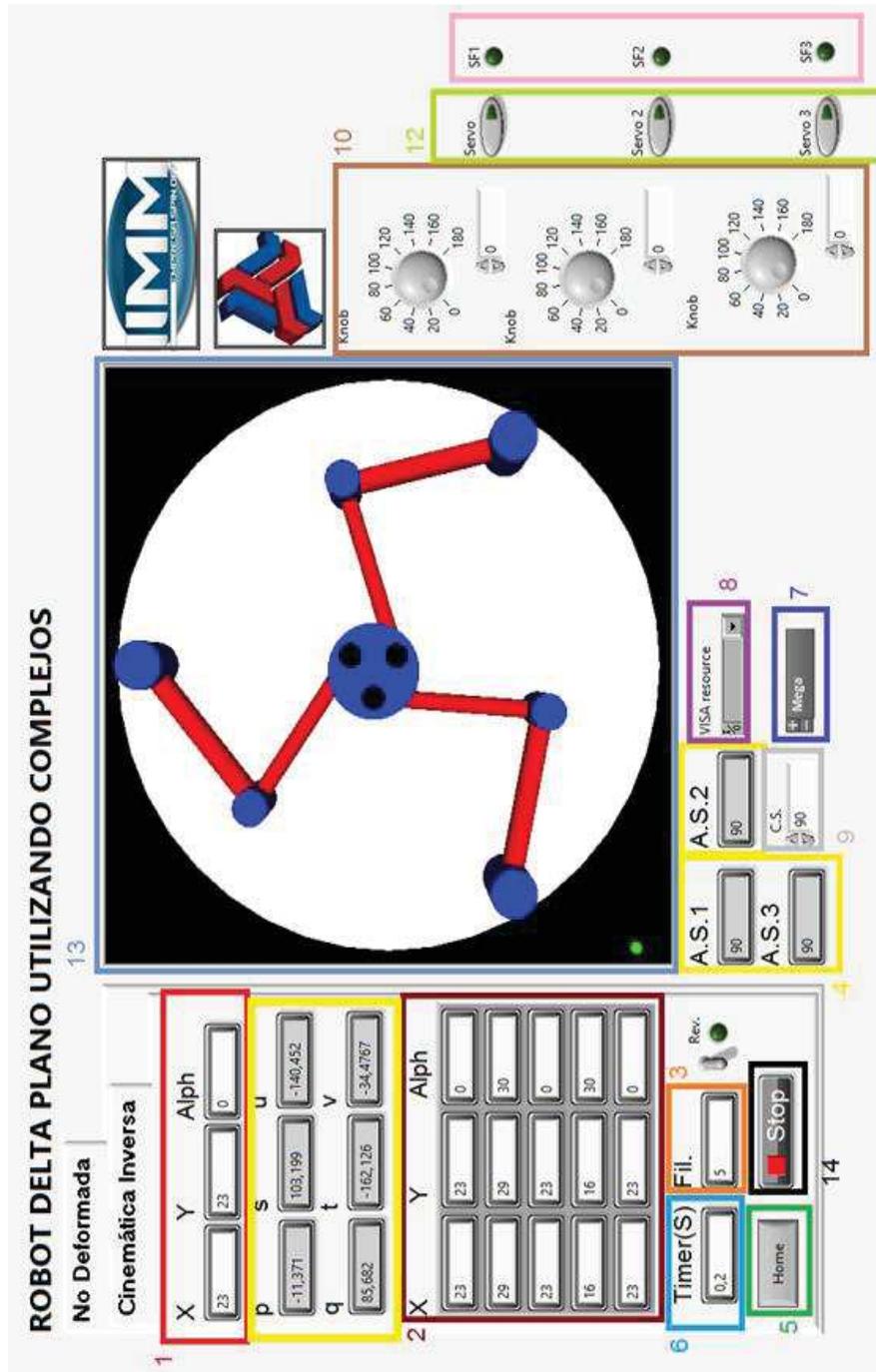


Figura 3.2 HMI del robot paralelo

El diagrama de flujo mostrado en la Figura 3.3 muestra la estructura operativa de la HMI.

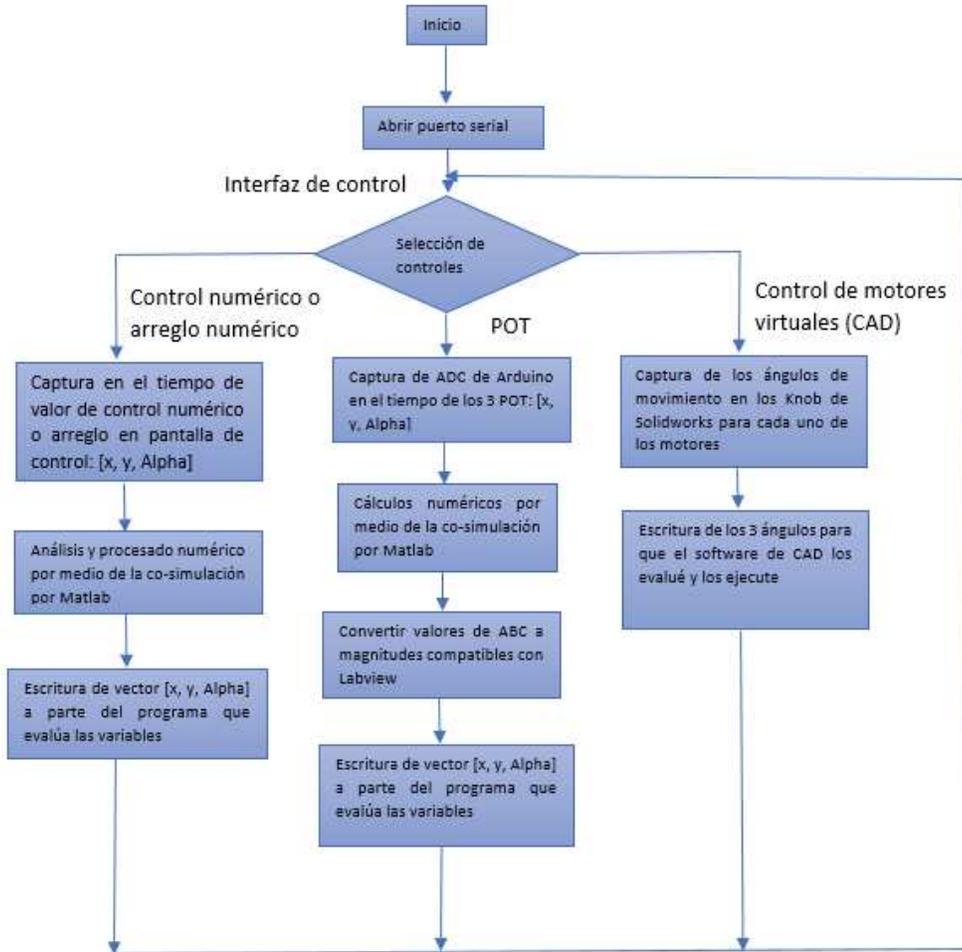


Figura 3.3 Diagrama de flujo de la interfaz

La Figura 3.4 muestra el robot en el ambiente Solidwork Motion.

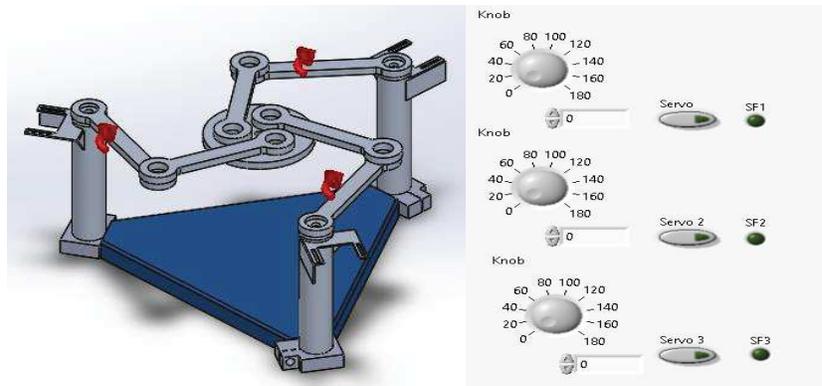


Figura 3.4 Robot simulado en Solidworks Motion



## 4. Conclusiones

En este artículo se ha desarrollado una HMI para el control de un robot paralelo plano. Las principales conclusiones se resumen en los puntos siguientes:

- Para el desarrollo de sistemas mecatrónicos es necesario incorporar la co-simulación, pues no existe un sólo software que sea capaz de brindar todo el soporte de control, visualización gráfica y modelado numérico, con la eficacia y eficiencia que requieren las aplicaciones. Es necesario que operen en forma coordinada dos o más softwares, compartiendo cada uno su potencial. Así, Matlab es un software de alto poder de cálculo pero bajo en poder de ambientación. En cambio Labview tiene ventajas en cuanto a la programación gráfica y de control, pero no cuenta con algoritmos matemáticos eficientes. En relación con el Solidworks, su potencial está en el poder gráfico, pero carece de algoritmos de poder en cálculo simbólico. Por ello, al interactuar de forma activa y pasiva los tres softwares el resultado es un simulador y un sistema mecatrónico altamente eficiente.
- Para el caso del sistema computacional descrito en este artículo, la co-simulación activa se realiza entre Matlab y Labview (bidireccional), mientras que la interacción entre Labview y Solidwork es activa (unidireccional). El software base de la co-simulación es Labview y la HMI generada tiene diversas funciones operativas del sistema.
- La co-simulación entre Labview y Solidworks abre las puertas al desarrollo de nuevas investigaciones que corresponden al análisis de materiales y estructuras.
- La co-simulación exige diversos recursos computacionales, por lo que es necesario contar con sistemas de cómputo lo suficientemente sobrados o bien con algoritmos eficientes para realizar las tareas derivadas de las aplicaciones.

## Referencias

- [1] Wei, H., Wu, W., Liu, M. “*Simulation of the Humanoid Running Robot Based on ADAMS*”. Tenth International Conference on Computer Modeling and Simulation. UKSIM 2008. , vol., no., pp.726-731, 1-3, 2008.
- [2] Johannes, E. “*System and method for co-simulation of heterogeneous systems*”. Patents US 6425762 B1. 2002.
- [3] Mohannad, A. “*Co-simulation Environment for Modeling Networked Cyber-Physical Systems*”. Tesis de Maestría en Ciencias. Queen’s University, Ontario, Canada. 2014.
- [4] Luo H., Liu, Y., Chen, Z., Leng, Y. “*Co-Simulation Control of Robot Arm Dynamics in ADAMS and MATLAB*”. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 6(20): 3778-3783, 2013.
- [5] Xuewen, R., Yibin, L., Jiuhong, R., Bin, L. “*Design and simulation for a hydraulic actuated quadruped robot*”. Journal of Mechanical Science and Technology, 26 (4), pp. 1171~1177. 2012.
- [6] Liu, Y., Zhu, C., Zhao, J. “*Research on Co-simulation for Mechatronic System of Parallel Robot*”. International Multi-Conference on Engineering and Technological Innovation. 2008.
- [7] Xiangyang, Z., Beilei, Z., Guohao, G. “*Control Parameters Optimization Based on Co-Simulation of a Mechatronic System for an UA-Based Two-Axis Inertially Stabilized Platform*”. Sensors, 15, 20169-20192. 2015.
- [8] Reyes, L. “*Sobre la parametrización de las Rotaciones y Reflexiones de Multicuerpos Rígidos en el plano*”. Estudios Ocasionales. Universidad Anáhuac del Sur. 1998
- [9] Velderrain, S., Jiménez, E., Urbalejo, A. Núñez, E., Reyes, L., Torres, J. Luna, N., Vázquez, I. “*Desarrollo de VI (Virtual Instruments) en LabVIEW para la simulación y el control de un robot paralelo didáctico*”. 12º Congreso Nacional de Mecatrónica, 8-3 Octubre 10 y 11. Pp. 178- 183. AMM. León, Guanajuato. 2013.
- [10] Jiménez, E., Reyes, L., Pérez, A., Vázquez, D. Ruelas, E., Ojeda, P. “*Modelado de un robot paralelo plano tipo RRR usando álgebra hipercompleja: rotación usual y rotación variante*”. Informe Interno de Investigación. Red-ALFA-ITESCA. 2006.



# Diseño de un controlador PID para la inmersión y emersión de un vehículo submarino tipo Glider

Reyes Montiel Christian Gerardo<sup>1</sup>, Ramos Fernández Julio Cesar<sup>1</sup>, Campos Mercado Eduardo<sup>2</sup>, Márquez Vera Marco Antonio<sup>1</sup>, Trejo Macotela Francisco Rafael<sup>1</sup>.

Universidad Politécnica de Pachuca. Carretera Pachuca - Cd. Sahagún km 20 Ex-Hacienda de Santa Bárbara, Zempoala, Hidalgo, México. CP. 43830. Tel. 01 (771) 54 77 510<sup>1</sup>  
CONACYT-UNISTMO. Ciudad Universitaria s/n Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, México. C.P. 70760. Tel. 01 971 712 7050<sup>2</sup>

## Resumen

*En el presente trabajo se muestra una metodología para sintonizar un controlador lineal tipo PID para regulación y emersión de un vehículo submarino tipo Glider, este tipo de reguladores sintonizados adecuadamente muestran robustez en su desempeño en plantas sometidas a grandes perturbaciones y cambios paramétricos del sistema como se ilustra en el estudio de simulación en este artículo.*

*Para el diseño del regulador PID se parametrizó un modelo una entrada una salida de 2 orden expresada en función transferencia, en donde la entrada es  $m_b$  (masa de lastre) y la salida es  $z$  (profundidad), que se obtuvo de manera experimental en simulación del sistema no lineal utilizando el modelo matemático de Graver, mediante un algoritmo que sintoniza la ganancia y margen de fase exactos por medio de la función transferencia en lazo abierto y por la herramienta de Matlab "ident". Así se obtiene un modelo simple, que es útil para sintonizar una ley de control. La metodología que se muestra en este artículo, indica resultados favorables en simulación para regulación a referencia tipo escalón. Los resultados de este estudio, indican su alta factibilidad para implementar este controlador en este tipo de vehículos autónomos.*

**Palabras clave:** Glider, modelo matemático de Graver, PID

## 1. Introducción

Los vehículos submarinos se pueden clasificar en vehículos tripulados, los cuales requieren de personas para su navegación y vehículos no tripulados, los cuales se controlan por vía remota (ROV) o por sistemas automáticos embarcados en el navío (AUV) [2], [4]. Los vehículos submarinos tipo Glider son vehículos autónomos no tripulados.

Un Glider es la definición en inglés del concepto castellano "planeador", se utiliza indistintamente para los conceptos de planeador aéreo y también submarino, para este estudio es un Planeador Autónomo Submarino (PAS), en el presente trabajo se describe el proceso de sintonización de un controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) para manipular la inmersión y emersión de un vehículo submarino tipo Glider. Con base al estudio en simulación del modelo matemático que describe el movimiento del vehículo, se obtiene un modelo definido por una función de transferencia, con el fin de obtener una representación matemática simple del Glider para el movimiento de inmersión y emersión, que posteriormente será útil para la sintonización de una ley de control tipo PID.

Los submarinos tipo Glider, como se muestra en la Figura 1, también llamados en inglés underwater Gliders o simplemente Gliders, controlan su nivel de profundidad cambiando autónomamente su propia flotabilidad usando actuadores internos, este tipo de vehículos no tripulados, por ejemplo, se utilizan en la investigación oceanográfica [15]. Para esto, se equipan con diversos instrumentos y sensores para medir parámetros ambientales físicos y recolectar datos relevantes o

necesarios como la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, PH, imágenes, además de poder estimar corrientes submarinas.



**Figura 1 Glider.**

El movimiento de los Gliders depende de un sistema de control de flotabilidad combinado con un conjunto de alas y timón para moverse en dirección vertical y horizontal a través de una columna de agua. El planeador desciende y asciende en la columna de agua debido al control del actuador de flotabilidad, que consiste en un par de recipientes con aceite, que se regula su contenido desde el recipiente en el centro de masa del Glider hacia un extremo del Glider, esta acción regulada permite cambiar el centro de flotabilidad de planeador, con lo que se obtiene la acción de inmersión y emersión. La flotabilidad se controla para ser levemente positiva, negativa o neutra [17]. Dentro de un vehículo submarino se instalan computadoras para la adquisición de datos y procesamiento de señales, así como algoritmos de control y navegación, en recientes trabajos de investigación para submarinos autónomos utilizan con éxito computadoras embebidas para la navegación que son del tipo Arduino, Raspberry Pi [1], [2], [4].

En la literatura se han propuesto diferentes estrategias de control para regular la posición, velocidad y la trayectoria en los Gliders y AUVs, como el controlador de punto fijo desacoplado a partir de las ecuaciones de movimiento como se muestra en [8]. Un control PID para regular el ángulo de cabeceo que ayuda a corregir la trayectoria del Glider en [4]. Reguladores cuadráticos lineales aplicados al Glider [11]. En [10] se presenta un análisis de control para el movimiento con una red neuronal artificial para un Glider híbrido. En [21] se describe un controlador con ganancias adaptables por retroalimentación basado en la dinámica de una red neuronal difusa. También se propone un controlador PID adaptable con anti-windup aumentado en [14]. En [18] se implementa un control adaptable utilizando el algoritmo Slotine-Li en un Glider híbrido. Por retroalimentación de estado para controlar el guiñado, cabeceo y el alabeo como se muestra en [19]. Para la identificación del sistema (en inglés Matlab System Identification) utilizando un modelo del tipo ARMAX en [9]. Con buenos resultados se utilizan técnicas de inteligencia artificial con el uso de algoritmos heurísticos y la técnica Q-learning [5]. Un control difuso para regular la velocidad y ángulo de guiñada en [6] y PID difuso con resultados favorables, donde utilizan submodelos lineales y la agregación de estos modelos con lógica difusa en [12].

En el presente trabajo se muestra una metodología para identificar un modelo lineal de la inmersión y emersión, con este modelo se sintoniza una ley de control del tipo PID, que es estable dentro de la región identificada. Para esto, se utilizó el modelo matemático de Joshua Grady Graver [7], el cual es no lineal y describe la dinámica del movimiento del submarino, Aunque existe el modelo de Fossen [3] que más común su uso para vehículos submarinos, por ser más sencillo, el cual está basado en la teoría de robots manipuladores.

El trabajo se divide por las siguientes secciones: en la Introducción se explica el funcionamiento de los gliders, la instrumentación que utilizan y un breve estado del arte. En la sección de Desarrollo se explica el modelo matemático de Joshua Grady Graver utilizado en esta investigación, se muestran las gráficas de las simulaciones en lazo abierto, como se obtuvo la función de transferencia del sistema y la comprobación de la estabilidad local del sistema de la función mediante Routh Hurwitz. En los Resultados se muestran las gráficas agregando el controlador PID y cerrando el lazo de control, también se comprobó la estabilidad local del sistema en lazo cerrado y de forma alterna se utiliza un algoritmo



que sintoniza la ganancia y margen de fase exactos, por medio de la función transferencia en lazo abierto para determinar las ganancias del controlador PID del sistema modelado, utilizando el algoritmo [19]. Y por último la sección de Conclusiones del trabajo.

## 2. Desarrollo

### 2.1 Metodología

La metodología utilizada en este artículo consiste en utilizar el modelo de [7] en Matlab Simulink, utilizando los parámetros hidrodinámicos, los valores de la masa del casco, masa del fluido desplazado, masa del vehículo, los vectores, los momentos, etc., como se ilustra en [2]. Se manipulo la masa móvil para los movimientos de inmersión con variaciones de tiempo en lazo abierto, con la finalidad de controlar el centro de gravedad del vehículo y en consecuencia la flotabilidad del vehículo.

Con los datos obtenidos en simulación, se utilizó la herramienta ident de Matlab para obtener una función de transferencia de un modelo una entrada una salida del sistema, identificando la relación salida entrada,  $z$  y  $m_b$  respectivamente, se obtuvo un modelo de segundo orden útil para sintonizar una ley de control clásica PID.. Se cerró el lazo de control con el modelo no lineal de Graver. Y se obtuvieron referencias tipo escalón.

### 2.2 Modelo matemático

En este trabajo se utiliza el modelo matemático de Joshua Grady Graver [7], se consideran las siguientes características del Glider para el modelo: fuerzas de gravedad y flotabilidad, los efectos de la masa agregada, la geometría del vehículo, inercia generada por el movimiento y densidad del fluido, las fuerzas hidrodinámicas que incluye arrastre, momento y sustentación [2]. Dinámicamente un vehículo submarino se considera como un cuerpo rígido de 6 grados de libertad (6 GDL). Existe una notación internacional por SNAME [16] para la posición, orientación, velocidad y fuerza de los 6 GDL, ver Tabla 1.

Tabla 1 Parámetros para vehículos submarinos.

GDL		Fuerzas y momentos (F,T)	Velocidad lineal y angular	Posición y ángulos de Euler
1	Movimiento en la dirección del eje x	X	$u$	$x$
2	Movimiento en la dirección eje y	Y	$v$	$y$
3	Movimiento en la dirección eje z	Z	$\omega$	$z$
4	Rotación sobre el eje x (alabeo)	K	$p$	$\phi$
5	Rotación sobre el eje y (cabeceo)	M	$q$	$\theta$
6	Rotación sobre el eje z (guiñada)	N	$r$	$\psi$



En el análisis dinámico se emplearon las ecuaciones de movimiento calculando la energía total del sistema para determinar los momentos de inercia, así mismo se aplican las leyes de Newton. Se modeló el submarino como un cuerpo rígido. De igual manera cuenta con una masa móvil controlable y el sistema de referencia al cuerpo tiene su origen en CB (centro de flotabilidad), como se muestra en la Figura 2.

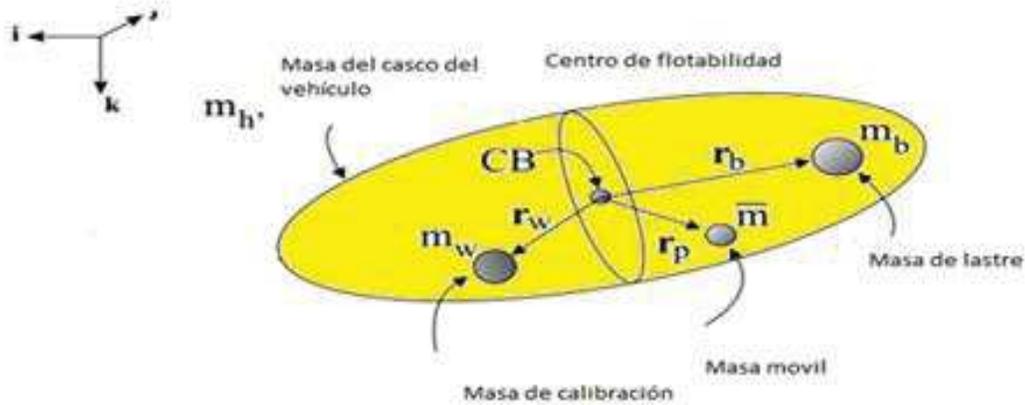


Figura 2 Representación de masas y vectores de posición.

Las ecuaciones completas de movimiento para el vehículo en un espacio tridimensional se muestran en (1):

$$\begin{bmatrix} \dot{R} \\ \dot{b} \\ \dot{\Omega} \\ \dot{v} \\ \dot{r}_p \\ \dot{r}_b \\ \dot{r}_w \\ \dot{P}_p \\ \dot{P}_b \\ \dot{P}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R\Omega \\ Rv \\ J^{-T}\bar{T} \\ M^{-1}\bar{F} \\ \frac{1}{m}P_p - v - \Omega \times r_p \\ \frac{1}{m_b}P_b - v - \Omega \times r_b \\ \frac{1}{m_w}P_w - v - \Omega \times r_w \\ \bar{u} \\ u_b \\ u_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde  $R$  es la matriz de rotación.  $b$  es el vector de posición.  $r_p, r_b, r_w$  son los vectores de posición de la masa móvil ( $\bar{m}$ ), de la masa de lastre ( $m_b$ ) y la masa de compensación ( $m_w$ ), respectivamente.  $P_p, P_b, P_w$  son los momentos lineales del cuerpo de  $\bar{m}, m_b$  y  $m_w$ , respectivamente en coordenadas del cuerpo.  $v$  es la velocidad en coordenadas del cuerpo.  $\bar{u}, u_b, u_w$  son fuerzas de control en la masa puntual ( $\bar{m}$ ), en masa de flotabilidad ( $u_b = \dot{P}_b$ ) y de la masa  $u_w = \dot{P}_w$ .  $\bar{T}$  es el momento lineal en coordenadas del cuerpo. Los elementos que lleven punto indican velocidades.

Donde el momento total en coordenadas del cuerpo está dada por la ecuación (2) y la fuerza total en coordenadas del cuerpo se representa con la ecuación (3).

$$\bar{T} = (J\Omega + \hat{r}_p P_p + \hat{r}_b P_b + \hat{r}_w P_w) \times \Omega + (M_v \times v) + (\Omega \times r_p) \times P_p + (\Omega \times r_b) \times P_b + (\Omega \times r_w) \times P_w + (\bar{m} \hat{r}_p + m_b \hat{r}_b + m_w \hat{r}_w)^* g R^T k + T_{ext} - \hat{r}_p \bar{u} - \hat{r}_b u_b + \hat{r}_w u_w \quad (2)$$

$$\bar{F} = (M_v + P_p + P_b + P_w) \times \Omega + m_o g R^T k + F_{ext} - \bar{u} - (u_b + u_w) \quad (3)$$



La ecuación (4) representa la fuerza externa en el vehículo y la ecuación (5) representa el momento externo ambas con referencia a las coordenadas del cuerpo.

$$F_{ext} = R^T \sum f_{ext_i} \quad (4)$$

$$T_{ext} = R^T \sum (x_i - b) \times f_{ext_i} + R^T \sum \tau_{ext_i} \quad (5)$$

El modelo longitudinal se deriva del modelo (1). Se hacen simplificaciones del diseño de la masa interna con respecto al modelo dinámico. Se determinan equilibrios de planeo estables y se realiza una linealización general alrededor de estos deslizamientos estables. Este modelo y la linealización se pueden utilizar para examinar la estabilidad de los deslizamientos estables y tiene aplicaciones en el diseño del planeador y en el diseño de sus sistemas de control [4].

Se hace la simplificación de masas considerando que  $m_b$  y  $m_w$  están fijas adentro del vehículo,  $m_w$  se considera nula, ya que no interviene y  $m_b$  es posicionada en el centro del Glider, por lo que  $r_b = 0$ . Esto elimina los efectos de inercia de la masa desplazada y el acoplamiento entre el momento de cabeceo y la masa de lastre resultante desplazada del centro de flotabilidad del vehículo. Un aspecto importante a considerar es sintetizar el modelo en el plano vertical, queda simplificado como a continuación se describe:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \text{sen} \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen} \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} x \\ 0 \\ z \end{bmatrix}, v = \begin{bmatrix} v_1 \\ 0 \\ v_3 \end{bmatrix}, \Omega = \begin{bmatrix} 0 \\ \Omega_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$r_p = \begin{bmatrix} r_{p1} \\ 0 \\ r_{p3} \end{bmatrix}, P_p = \begin{bmatrix} P_{p1} \\ 0 \\ P_{p3} \end{bmatrix}, \bar{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ 0 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Las ecuaciones de movimiento para el vehículo restringido al plano vertical, se muestran a continuación:

$$\dot{x} = v_1 \cos \theta + v_3 \text{sen} \theta \quad (8)$$

$$\dot{z} = -v_1 \text{sen} \theta + v_3 \cos \theta \quad (9)$$

$$\dot{\theta} = \Omega_2 \quad (10)$$

$$\dot{\Omega}_2 = \frac{1}{J_2} \left( (m_3 - m_1) v_1^* v_3 - (r_{p1} P_{p1} + r_{p3} P_{p3}) \Omega_2 - \bar{m} g (r_{p1} \cos \theta + r_{p3} \text{sen} \theta) + M_{DL} - r_{p3} u_1 + r_{p1} u_3 \right) \quad (11)$$

$$\dot{v}_1 = \frac{1}{m_1} \left( -m_3 v_3 \Omega_2 - P_{p3} \Omega_2 - m_0 g \text{sen} \theta + L \text{sen} \alpha - D \cos \alpha - u_1 \right) \quad (12)$$

$$\dot{v}_3 = \frac{1}{m_3} \left( -m_1 v_1 \Omega_2 + P_{p1} \Omega_2 + m_0 g \text{sen} \theta - L \text{sen} \alpha + D \cos \alpha + u_3 \right) \quad (13)$$

$$\dot{r}_{p1} = \frac{1}{m} P_{p1} - v_1 - r_{p3} \Omega_2 \quad (14)$$

$$\dot{r}_{p3} = \frac{1}{m} P_{p3} - v_3 + r_{p1} \Omega_2 \quad (15)$$

$$\dot{P}_{p1} = u_1 \quad (16)$$

$$\dot{P}_{p3} = u_3 \quad (17)$$



$$\dot{m}_b = u_4 \quad (18)$$

Donde  $\alpha$  es ángulo de ataque,  $D$  es el arrastre,  $L$  es sustentación,  $\theta$  es el ángulo de cabeceo,  $v_1$  y  $v_3$  son velocidad con respecto al marco del cuerpo,  $M_{DL}$  es el momento viscoso,  $J_2$  es el elemento de inercia,  $m_1$  y  $m_3$  son masas,  $m_0$  es el exceso de masa,  $u_1$  y  $u_3$  son entradas a vectores de control,  $u_4$  es la masa variable controlada,  $r_{p1}$  y  $r_{p3}$  son componentes de posición de la masa móvil y  $P_{p1}$  y  $P_{p3}$  son componentes del momento lineal.

Aunque en el trabajo realizado en este documento el modelo no se linealiza ya que en las simulaciones realizadas fue la respuesta ante entradas de cambio de masa en forma cíclica en el tiempo.

### 2.3 Modelado e identificación paramétrica de un modelo lineal

En la etapa de modelado e identificación, se realizó la simulación con Matlab Simulink en lazo abierto, utilizando el modelo matemático de Graver [7], que se ha descrito previamente, donde la masa móvil del vehículo se manipula con movimientos de inmersión, con secuencias controladas en el tiempo para:  $m_b$  de  $-0.5$  a  $0.5$ , y  $r_p$  de  $[-0.3; 0; 0]$  a  $[0.3; 0; 0]$ , tal que es una excitación persistente pseudo binaria, con la que se obtiene la respuesta del sistema en lazo abierto, que será la variable a controlar. No se realiza una linealización del modelo de Graver, basada en la serie de Taylor, ya que no es el objetivo de este trabajo, mejor aún para efectos experimentales es obtener un modelo lineal basado en la identificación paramétrica de las mediciones de la entrada-salida. En la Figura 3 se muestra la respuesta de inmersión y emersión en lazo abierto en simulación,  $z(m)$  es la profundidad del vehículo que hace inmersiones hasta 4 m, regresando a la superficie, se repite esta secuencia como se observa, es decir: el centro de gravedad del submarino se maneja con ciclos controlados en el tiempo en lazo abierto. El ángulo de cabeceo reacciona de acuerdo a la dinámica del vehículo, ver Figura 4 y el movimiento de la masa de lastre ( $m_b$ ) cambia de acuerdo a los valores establecidos en la simulación, ver Figura 5.

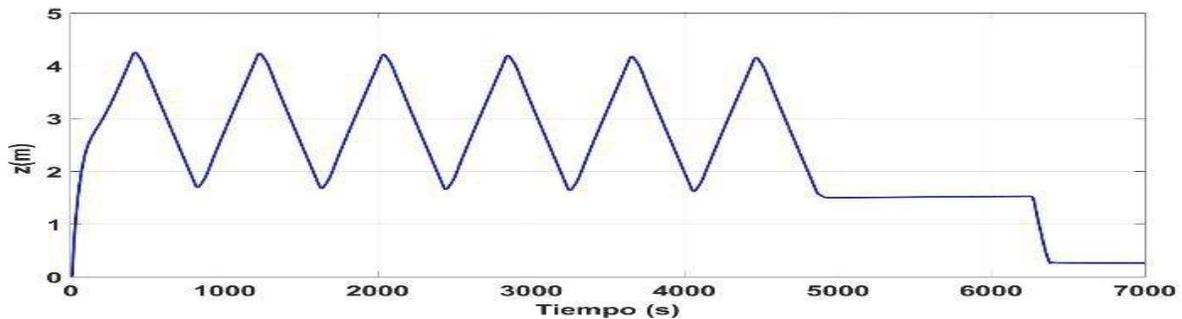


Figura 3 Profundidad en lazo abierto.

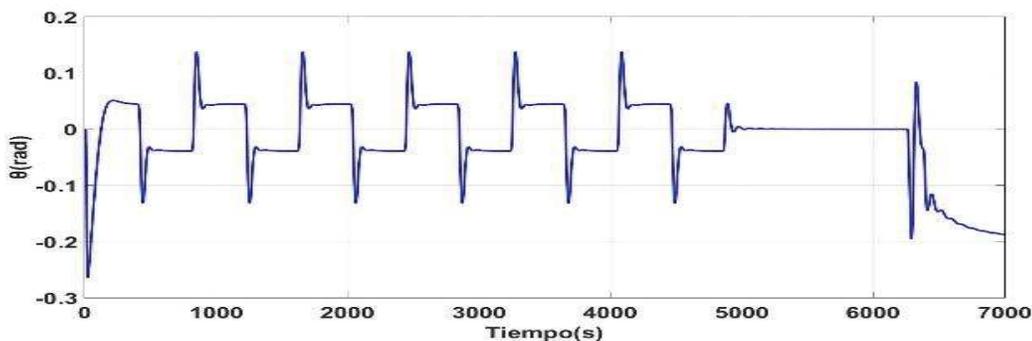
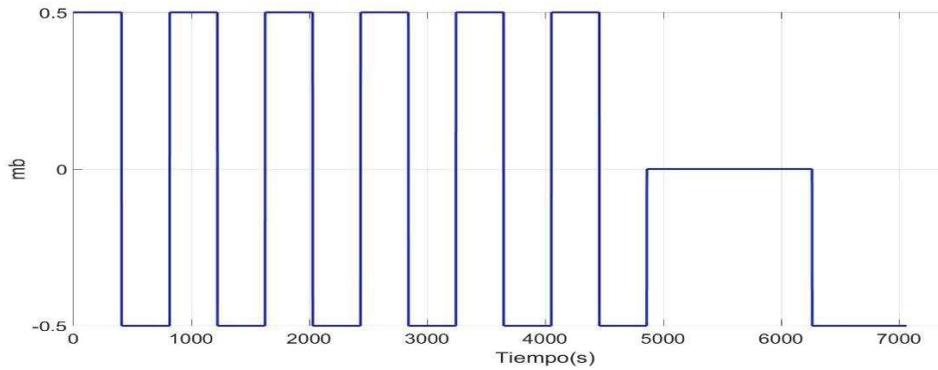
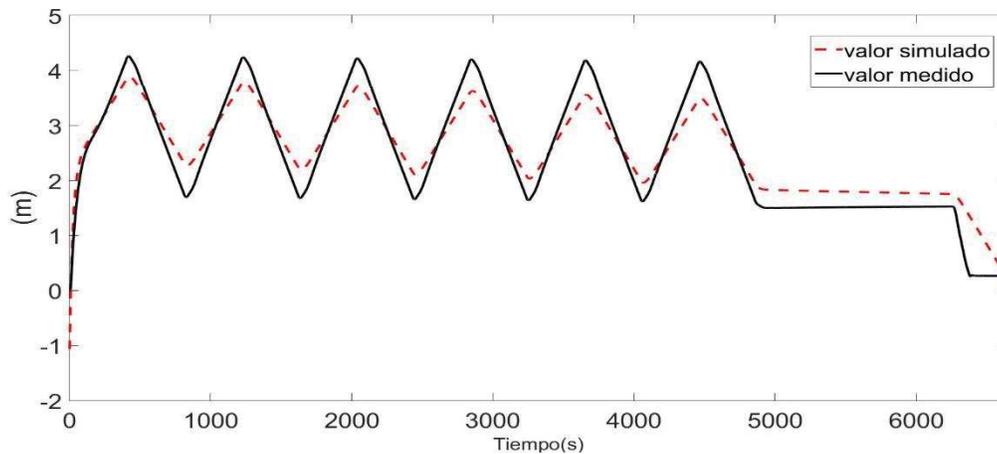


Figura 4 Ángulo de cabeceo.



**Figura 5 Masa en kilogramos de lastre en lazo abierto.**

A continuación, utilizando la herramienta ident de system identification de Matlab para obtener la función de transferencia, de un modelo simple y lineal: una entrada y una salida ( $m_b$  y  $z$  respectivamente), ya que el modelo es no lineal de esta forma se obtiene un modelo simple, que sea útil para sintonizar una ley de control. Se estiman los parámetros para tener una respuesta similar a la que se obtiene de la respuesta del modelo de Graver en lazo abierto, ver Figura 6, esta es una aproximación aceptable, que es útil para sintonizar un controlador PID, basado en un modelo lineal.



**Figura 6 Salida del modelo medido y simulado**

La función de transferencia parametrizada que resulta es de segundo orden, que se muestra en la ecuación (19):

$$G(s) = \frac{k}{(1 + T_{p1}s)(1 + T_{p2}s)} \quad (19)$$

dónde:  $k = 261.1$ ,  $Tp1 = 31169$ ,  $Tp2 = 22.527$ , posteriormente se conecta en cascada el modelo con el controlador PID y se cierra el lazo de control, se determina la ecuación característica y mediante el método computacional de Simulink, se determinan las ganancias del controlador. La función de transferencia sustituyéndola con sus valores mostrados, queda de la siguiente forma:

$$\frac{k}{a s^2 + b s + c} = \frac{261.1}{702144.063 s^2 + 31191.527 s + 1} \quad (20)$$

Para saber en qué lugar donde están localizados los polos se utilizó la fórmula general

$$s_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (21)$$



Donde  $s_1 = -3.208315955 \times 10^{-5}$  y  $s_2 = -0.04439117503$

Así mismo se ilustra el lugar de las raíces, obtenidos por Matlab, donde los polos están ubicados en el semiplano izquierdo del plano complejo, ver Figura 7., el sistema resultante de segundo orden se considera localmente estable, dentro de la dinámica de experimentación, es decir no podemos asegurar que este modelo sea estable en cualquier zona de operación. Los polos son los siguientes:  $s_1 = -3.208315955 \times 10^{-5}$  y  $s_2 = -0.0443911$ .

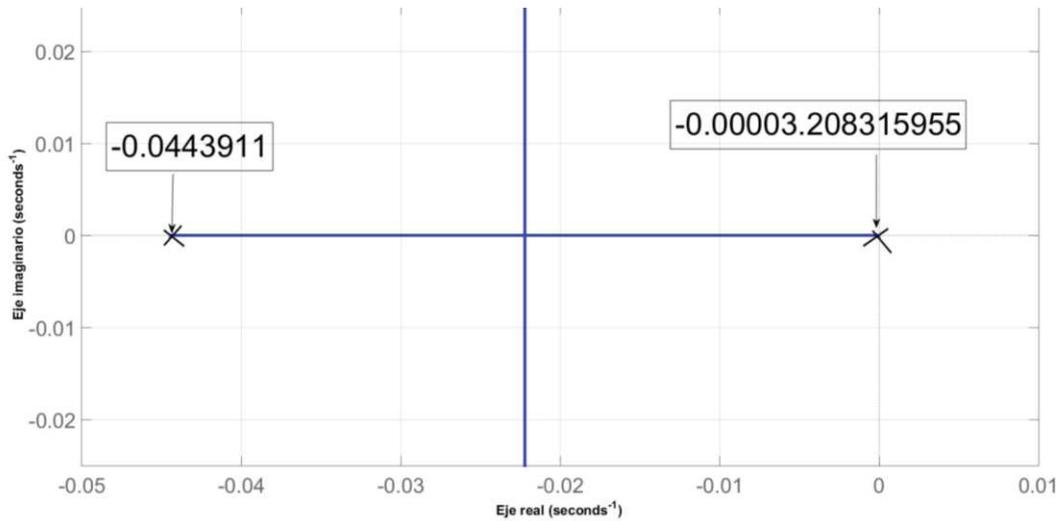


Figura 7 Lugar de las raíces en lazo abierto.

### 3. Resultados

Las ganancias sintonizadas: proporcional, integral y derivativa ( $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$ ), se determinaron mediante herramientas computacionales de Matlab Simulink, se sintonizan de manera automática, utilizando el modelo que se obtiene de forma experimental, la ley de control se implementó en lazo cerrado en simulación con el modelo de Graver, con resultados de convergencia favorables. Los valores de las ganancias son  $k_p = 0.10527$ ,  $k_i = 0.0011892$  y  $k_d = 0.7901$ .

#### 3.1 Implementación de las ganancias obtenidas por la herramienta "ident".

Se muestra un estudio en simulación en lazo cerrado, en donde se conecta en cascada el controlador PID a la variable manipulada, la cual es  $m_b$  del modelo de Graver, se cierra el lazo de control con la retroalimentación, como se muestra en la Figura 8. Para este estudio lo que se resalta es el desempeño de un controlador PID sintonizado con un modelo lineal estable, que sintetiza una región de operación de un modelo complejo para este caso de un submarino. En la simulación, se realizó la regulación de la profundidad, la referencia es de 8 m, como se muestra en la Figura 9, se observa un sobre impulso y a los 500 segundos se hace estable a la referencia fijada.

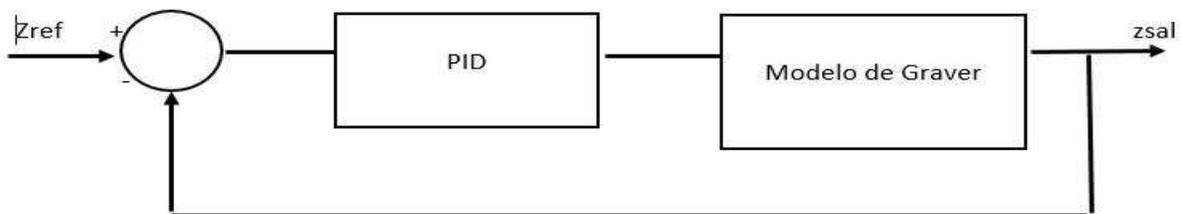
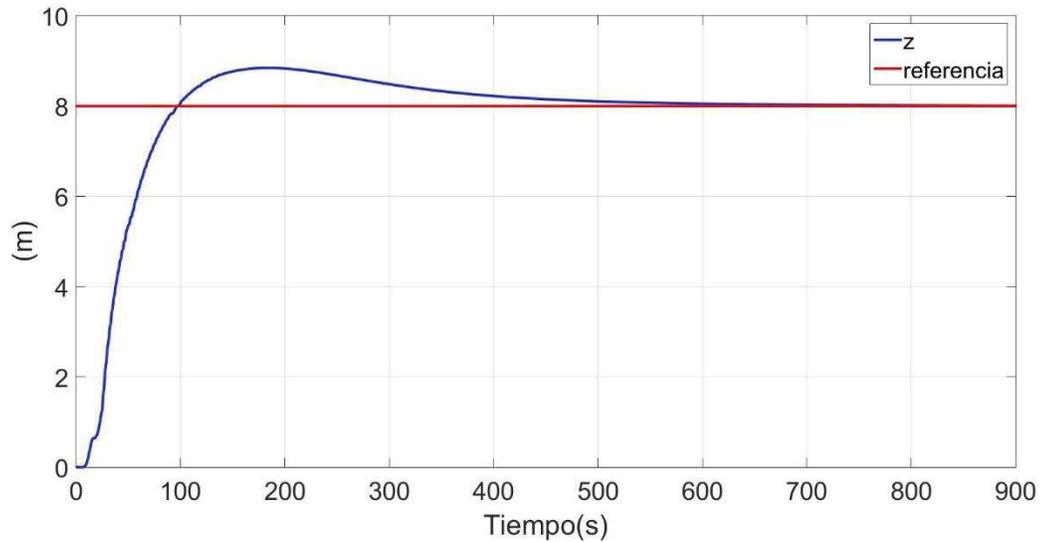
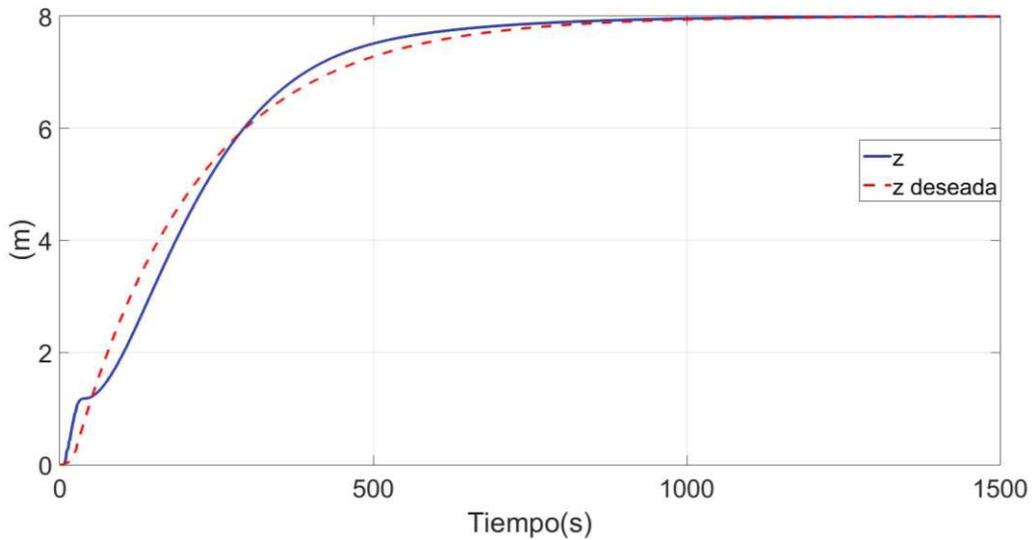


Figura 8 Diagrama del sistema de control de inmersión usando el modelo no lineal.



**Figura 9 Regulación de inmersión a una profundidad de 8 metros.**

Se implementó un filtro de primer orden  $\left(\frac{1}{100s+1}\right)$  en la referencia, para evitar el sobre impulso, tarda más tiempo en llegar a la referencia deseada, aproximadamente a los 1000 segundos, sin embargo es una trayectoria suave, ver Figura 10.



**Figura 10 Referencia de filtro de primer orden en la referencia.**

En la Figura 11 se muestra la masa de lastre ( $m_b$ ) interna donde inicia en cero, lo cual es la mitad de su capacidad, es decir, tiene 250 g, desciende a -0.5, implica que se llena a toda su capacidad (500 g) para volver a cero gramos, lo que indica que el Glider tiene flotabilidad neutra.

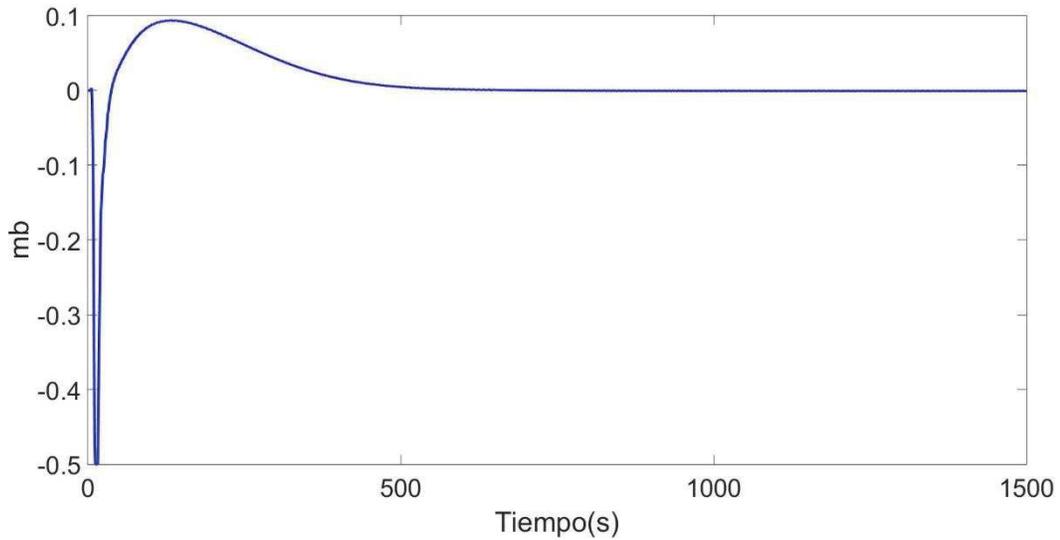


Figura 11 Masa de lastre.

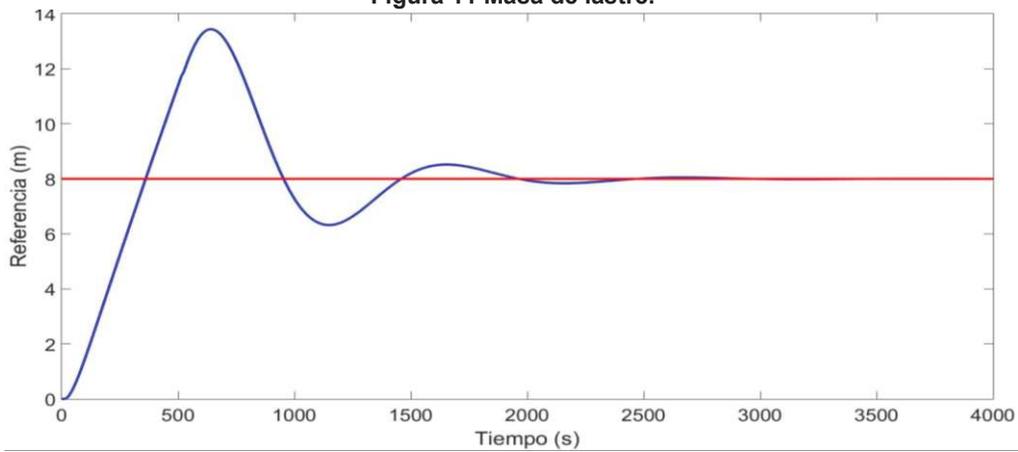


Figura 12 Regulación del sistema identificado con el PID sintonizado

En la Figura 12 muestra la función de transferencia con el controlador PID sintonizado con la herramienta Matlab Simulink, se observa que hay sobre impulso en la respuesta en relación a la Figura 9 lo que indica el modelo simple identificado como todo modelo de aproximación no identifica plenamente todas las dinámicas, sin embargo, se observa que llega a la misma referencia de 8 m con un tiempo mayor.

### 3.2 Estabilidad local del sistema lineal identificado

En la Figura 13 se muestra el diagrama de bloques en lazo cerrado con la función de transferencia obtenida del modelo. Se reduce y en la ecuación (24) se muestra la función transferencia resultante y la sustitución con sus valores correspondientes, ver Figura 14.

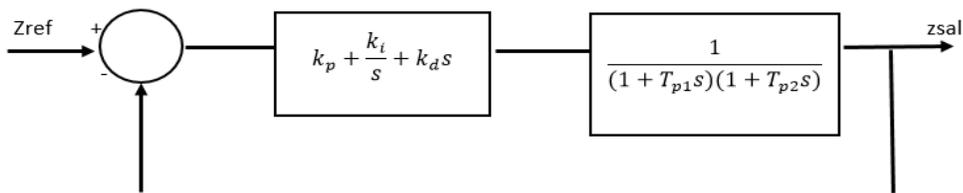


Figura 13 Diagrama de bloques.



$$\frac{zsal}{zref} = \frac{k(k_p s + k_i + k_d s^2)}{(T_{p1} T_{p2}) s^3 + (T_{p1} + T_{p2}) s^2 + s + k(k_p s + k_i + k_d s^2)} \quad (22)$$

Figura 14 Reducción a la forma canónica.

Utilizando el criterio de estabilidad de Routh Hurwitz [13], se comprobó la estabilidad local del sistema en lazo cerrado, donde los 3 polos resultantes de la ecuación característica se ubican en el semiplano izquierdo del plano complejo, los cuales son  $s_1 = -0.0437$ ,  $s_2 = -0.0003$  y  $s_3 = -0.0003$ , ver Figura 15. Esto indica que el sistema en lazo cerrado es estable, para la zona modelada.

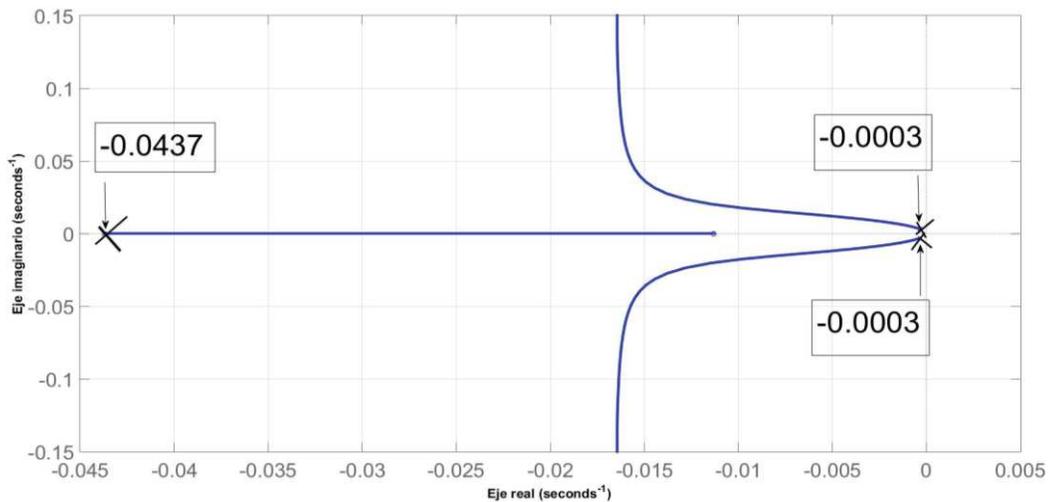


Figura 15 Lugar de las raíces en lazo cerrado.

### 3.3 Cálculo de las ganancias del controlador PID con la ganancia y margen de fase

En esta sección se utiliza un algoritmo que sintoniza la ganancia y margen de fase exactos, por medio de la función transferencia en lazo abierto. Así de esta forma alterna, se determinaron las ganancias del controlador PID del sistema modelado, utilizando el algoritmo descrito en [19], la idea es sintonizar los valores de las ganancias  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  de tal forma que se obtengan la ganancia y margen de fase que cumplan las igualdades [2] y [3] de la ley de control. Debido a la forma como se obtiene el modelo que se describió en la sección 2.3, las raíces de la ecuación característica (polos) indican que el sistema identificado es lineal, con polos dominantes cerca del origen.

El procedimiento es simple, sin embargo, mediante simulación se sintonizan parámetros internos del procedimiento que a continuación se describe, ver Tabla 2, los cuales son descritos en [19].

Tabla 2 Valores ocupados para la obtención de ganancias del PID

Variables	Significado	Funciones, restricciones y parámetros
$A_m$	Margen de ganancia	$A_m > 1$



	Margen de fase	$0 < \phi m < \frac{\pi}{2}$
$\omega c$	Ancho de banda en lazo abierto	Valor de la frecuencia cercano al cruce en el eje de los reales, dentro de la gráfica del diagrama de Nyquist
$\omega p$	Ancho de banda en lazo cerrado	$\omega p = \alpha * \omega c$ , donde $\alpha \in [0, 2]$ , se toma $\alpha = 1$
$\omega g$	Ganancia del cruce de frecuencias del lazo cerrado	
$j$	Complejo imaginario	$\sqrt{-1}$
$Re$	Valor real	
$Im$	Valor imaginario	
$G$	Función de transferencia de la planta en lazo abierto	$\frac{k}{(1 + T_{p1}s)(1 + T_{p2}s)}$
$Xp$	Variable imaginaria interna del sistema	$X_p = Im(\frac{-1}{Am * G(j\omega p)})$
$Xg$	Variable imaginaria interna del sistema	$X_g = Im(\frac{-\exp(j\phi m)}{G(j\omega g)})$

Primero se obtiene  $G(j\omega p)$ , el cual se sustituyen los valores de s por j, donde los valores de la función de transferencia son los mismos de la sección 2.3, por lo que queda de la siguiente forma:

$$G(j\omega p) = \frac{261.1}{702144.063(j\omega p)^2 + 31191.527(j\omega p) + 1} = -0.0338 - i0.0158 \quad (23)$$

Donde  $Am = 1.2$  y podemos obtener  $Kp$ .

$$Kp = Re(\frac{-1}{Am * G(j\omega p)}) = 0.0113 \quad (24)$$

Donde  $\omega g \in [0, \omega p]$ , el cual es de 0.004942

$$G(j\omega g) = \frac{261.1}{702144.063(j\omega g)^2 + 31191.527(j\omega g) + 1} = -0.1755 - i1.6754 \quad (25)$$

$$f(\omega p) > \frac{1}{Am} \quad (26)$$

$$\frac{\cos(\phi m - \angle G(j\omega p))}{\cos(\angle G(j\omega p))} > \frac{1}{Am} \quad (27)$$

Se realiza la condición para satisfacer  $\omega g$ , que es la siguiente:

$$Re(\frac{-\exp(j\phi m)}{G(j\omega g)}) = Re(\frac{-1}{Am * G(j\omega p)}) = 0.0113 \quad (28)$$

El cual resulta igual al valor obtenido a  $Kp$ , por lo tanto, cumple con ello. A continuación se obtienen las variables imaginarias internas del sistema:

$$Xp = Im(\frac{-1}{Am * G(j\omega p)}) = 0.0053 \quad (28)$$

$$Xg = Im(\frac{-\exp(j\phi m)}{G(j\omega g)}) = 0.0536 \quad (29)$$

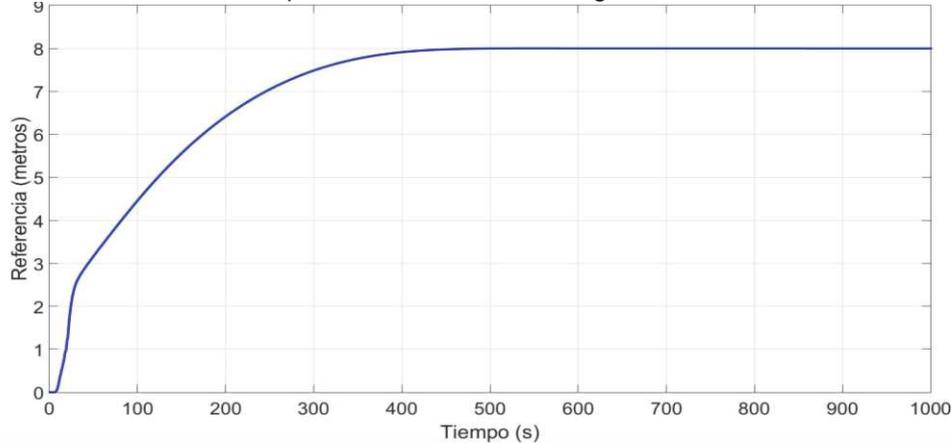
Obteniendo las ganancias integral y derivativa ( $K_i$  y  $K_d$ )

$$K_i = (Xp * \omega g - Xg * \omega p) * (\frac{\omega p}{\omega g} - \frac{\omega g}{\omega p})^{-1} = -2.6407e-04 \quad (30)$$



$$K_d = \left(\frac{X_p}{\omega_g} - \frac{X_g}{\omega_p}\right) * \left(\frac{\omega_p}{\omega_g} - \frac{\omega_g}{\omega_p}\right)^{-1} = 0.0262 \quad (31)$$

Como  $K_i$  es igual  $-2.6407e-04$ , se considera como cero, se agregan el valor de las ganancias a la simulación del modelo. En la Figura 15 se muestra la respuesta de inmersión llegando a la referencia indicada de 8 m donde es estable aproximadamente a 450 segundos.



**Figura 15 Profundidad mediante la sintonización del PID de ganancia y margen de fase exactos**

#### 4. Conclusiones

Se obtuvo un modelo una entrada y una salida, a partir del modelo no lineal de Graver, con el que se logró sintonizar un controlador PID comprobando la estabilidad local en lazo cerrado, mediante simulación se comprobó la eficacia en regulación.

Una primera etapa de este trabajo de investigación es comprobar mediante estudio de simulación del modelo de Graver, la posibilidad de identificar un modelo lineal con la experimentación de excitación controlada en ciclos de tiempo, para sintonizar una ley de control PID, como se muestra en este trabajo se obtuvieron resultados alentadores. En una segunda etapa de este proyecto se implementará el controlador PID en el prototipo físico que se ha desarrollado. La posibilidad de identificar modelos lineales estables para este prototipo indica una futura aplicación de una ley de control del tipo de ganancias programables PID utilizando una agregación paralela de los controladores con técnicas difusas para la operación en diferentes zonas de estudio experimental linealizadas.

Para este trabajo no se llevó a cabo la controlabilidad y observabilidad, el cual implica llevar al sistema a espacio de estados, porque no es uno de los objetivos para este artículo. Sin embargo, se realiza un análisis de estabilidad mediante Routh Hurwitz de la función de transferencia obtenida.

En la sección 3.3 se realizó el método de márgenes de ganancia especificados por el usuario para el diseño del controlador. Se ocupa este método porque el conjunto de incógnitas sobrepasa el conjunto de ecuaciones en el problema, se introduce una ecuación extra por relacionando el ancho de banda de circuito cerrado con el ancho de banda del proceso.

En la sección 3.1 se implementaron las ganancias obtenidas las ganancias mediante herramientas computacionales de Matlab Simulink, utilizando el bloque del controlador PID de Simulink se obtuvieron las figuras de esa sección, mientras en el apartado 3.3 se ocupó el método de márgenes de ganancia donde se obtiene las ganancias para el control, el cual se simula en Simulink, pero sin utilizar el bloque PID, solo se agregan las ganancias utilizando bloques integrador y derivativo para  $K_i$  y  $K_d$  respectivamente. Los valores cambian respecto ambos métodos, pero con ambos se lleva a la referencia indicada por el usuario.



Por último, los resultados son alentadores para poder implementarlos en un prototipo físico para poder obtener diversos datos.

## Referencias

- [1] Antonio Yáñez, E. D. "*Pilotaje autónomo de un mini-submarino con visión artificial*". 2012. CINVESTAV-DCA.
- [2] Díaz Moreno, J. "*Modelado matemático y construcción de un vehículo submarino tipo Glider*". 2017. UPP-Maestría en Mecatrónica.
- [3] Fossen, T. I. "*Marine Control Systems. Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*". 1ª Edición. John Wiley & Sons Ltd., 2002.
- [4] García Rangel, M, A. "*Diseño, modelado y control de un glider*". 2016. CINVESTAV-UMI-LAFMIA.
- [5] Gautam, U., Ramanathan, M. "*Simulation for Path Planning of SLOCUM Glider in Near-bottom Ocean Currents Using Heuristic Algorithms and Q-Learning*". Defence Science Journal, Vol. 65(3). 2015. pp. 220-225.
- [6] González, J., Gómariz, S., Batlle, C., Galarza, C. "*Fuzzy controller for the yaw and velocity control of the Guanay II AUV*". IFAC. Vol. 48(2). 2015. pp. 268-273.
- [7] Graver, J, G. "*Underwater Gliders: Dynamics, Control and Design*". 2005. Princeton University.
- [8] Herman, P. "*Decoupled PD set-point controller for underwater vehicles*". Ocean Engineering. 2009. pp. 529-534.
- [9] Hussain, N, A., Arshad, M, R., Mohd-Mokhtar, R. "*Underwater glider modelling and analysis for net buoyancy, depth and pitch angle control*". Ocean Engineering. 2011. pp. 1782-1791.
- [10] Isa, K., Arshad, M. "*Neural networks control of hybrid-driven underwater glider*". IEEE, 2012.
- [11] Mahmoudian, N. "*Efficient Motion Planning and Control for Underwater Gliders*". 2009. Virginia Polytechnic Institute.
- [12] Mann, G, K, I., Sinha, A. "*Analytical Structures for Fuzzy PID Controllers*". IEEE, FUZZY SYSTEMS. Vol. 16(1), 2008
- [13] Ogata, K. "*Ingeniería de control moderna*". 5ª Edición, 2010, PEARSON EDUCACIÓN, S.A., Madrid.
- [14] Sarhadi, P., Noei, A, R., Khosravi, A. "*Model reference adaptive PID control with anti-windup compensator for an autonomous underwater vehicle*". Robotics and Autonomous Systems. 2016. pp. 87-93.
- [15] SOCIB. Junio 2017. <http://www.medcliv.es/es/instrumentos/glider/>.
- [16] *The Society of Naval Architects and Marine Engineers. Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid. Technical and Research Bulletin No. 1-5*
- [17] Ullah, B., Ovinis, M., Baharom, M, B., Javaid. "*Underwater Gliders Control Strategies: A Review*". IEEE. 2015.
- [18] Uriza, O, R., Torres, J., Salgado-Jimenez, T., Campos, E., Garcia-Valdovinos, L. "*Adaptive Control for Hybrid Underwater Gliders*". ResearchGate, 2016.
- [19] Vervoort, J, H, A, M. "*Modeling and Control of an Unmanned Underwater Vehicle*". 2008. University of Canterbury.
- [20] Wang, Q., Fung, H., Zhang, Y. "*PID tuning with exact gain and phase margins*". Elsevier Science Ltd. ISA Transactions 38. 1999. pp. 243-249.
- [21] Zhang, L., Qi, X, J., Pang. "*Adaptive output feedback control based on DRFNN for AUV*". Ocean Engineering. 2009. pp. 716-722.



# GUI para adquisición y calibración de imágenes en procesos de reconstrucción de 3D de objetos

Ramos Arreguín Carlos Alberto<sup>1</sup>, Moya Morales Juan Carlos<sup>1</sup>, López Torres Claudia<sup>1</sup>,  
Ramos Arreguín Juan Manuel<sup>2</sup>, Pedraza Ortega Juan Carlos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro

## Resumen

*Este trabajo presenta el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario, la cual puede ser aprovechada en procesos de reconstrucción de objetos, específicamente en métodos que utilicen proyección de patrones de franjas. La interfaz se enfoca específicamente en la etapa de adquisición de la escena y calibración del objeto, permitiendo capturar imágenes de acuerdo a las necesidades del usuario, ya que es posible configurar manualmente las propiedades del sensor de adquisición. Una vez adquirida la escena es posible solo almacenarla o bien, realizar su ajuste de calibración para posteriormente realizar la reconstrucción del objeto que se encuentra dentro de la escena. La resolución de las imágenes adquiridas es de 640x480 pixeles, con una profundidad RGB de 24 bit. Cabe señalar que, al ser calibradas, su tamaño puede disminuir.*

**Palabras clave:** GUI, Matlab, Reconstrucción 3D, Calibración

## 1. Introducción

La adquisición de imágenes, generalmente es la primera etapa dentro de un sistema de procesamiento de imágenes o visión asistida por computadora, el cual, usualmente es aplicado en proyectos de robótica, medicina, simulación, análisis de patrones, entre otros [1]. Para ello es necesario utilizar dispositivos capaces que permitan sensar la información de una escena (imagen), estos dispositivos o sensores son conocidos como cámaras digitales. En la actualidad estos dispositivos permiten la adquisición de imágenes tanto estáticas (fotografías) cómo dinámicas (video). En ocasiones, es necesario realizar un post-procesamiento a la escena adquirida, debido a que la imagen capturada se obtiene con distorsiones provocadas por la luz del entorno donde se encuentra el objeto, estas distorsiones pueden causar resultados inesperados.

Una aplicación donde suele ocurrir lo anteriormente mencionado, es en la digitalización o reconstrucción 3D de objetos [2 - 5], lo cual, ha sido uno de los trabajos más desafiantes en los últimos años, por lo que, investigadores del área de gráficos por computadora y profesionales de la fotografía han estado trabajando en mejorar los algoritmos de reconstrucción 3D para adaptarse a las altas exigencias de diversas aplicaciones de la vida real, como lo son: ciencias médicas, industria de la animación, realidad virtual, reconocimiento de patrones y la ingeniería inversa. En la actualidad existen diversos tipos de cámaras como lo son: cámaras fotográficas económicas, profesionales, webcams, de video, entre otras. Un ejemplo de ello se muestra en la Tabla 1.

El objetivo de este trabajo es proporcionar una herramienta visual que permita la automatización del proceso de adquisición de escenas y la calibración de las mismas para un proceso de reconstrucción de objetos 3D empleando el método de proyección de patrones de franjas.



**Tabla 1. Ejemplo de dispositivo de adquisición de imágenes [7]**

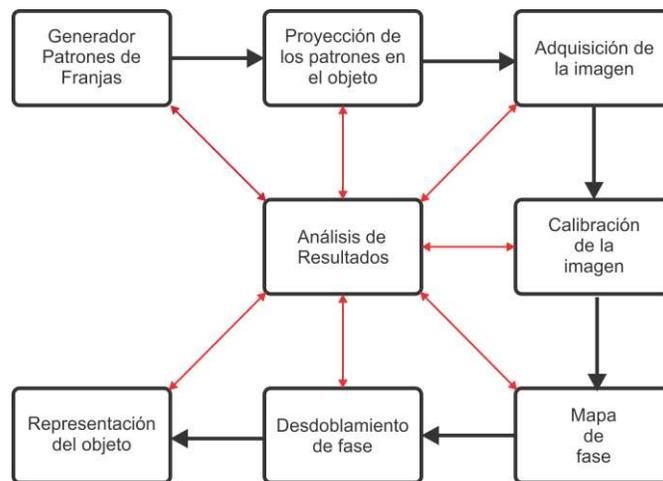
Nombre	Descripción	Imagen
Logitech C920 HD Pro webcam	Full HD 1080p Puerto USB Corrección automática de iluminación Autofoco Resolución óptica Real: 3MP Por software 15 MP Campo visual 78° Longitud Focal 3.67 mm Captura de imágenes: 2.0 MP, 3 MP, 6 MP, 15 MP 1080p 30 fps	

## 2. Marco Teórico

En la actualidad existe una gran diversidad de herramientas y lenguajes de programación como, por ejemplo: Visual Studio de Microsoft (Visual Basic, C++, C#) [8], Dev C++ (C++) [9], Netbeans (C++, Java, Python) [10] y Matlab (lenguaje m) [11], entre otros. Estas herramientas permiten desarrollar GUIs desde código, o bien, mediante un editor gráfico incorporado en el software anteriormente mencionado. Una de las ventajas de estos editores gráficos es que reduce el tiempo de diseño de la interfaz deseada (front end), y posteriormente codificar la funcionalidad de cada elemento. En este trabajo, se optó por desarrollar la herramienta utilizando la herramienta GUIDE (Grafical User Interface Development Environment) de Matlab, por su naturaleza permite trabajar con matrices de una manera rápida y sencilla, en cuanto a líneas o instrucciones de código se refiere, a diferencia de otros lenguajes como C++ y Java. Cabe mencionar, que este proyecto se enfoca en el procesamiento de imágenes que pueden ser tratadas como matrices. Su paradigma de programación es orientado a objetos al igual que los ya mencionados.

### 2.1 Reconstrucción 3D de Objetos

Existen al menos 3 métodos diferentes para el proceso de reconstrucción de objetos 3D que son: método de la Transformada de Fourier (FTP), método de la Transformada Wavelet (WTP) y Cambio de Fase (PSP). Los métodos anteriormente mencionados tienen en común al menos 5 etapas que se describen a continuación y se representa gráficamente en la Figura 1:



**Figura 1. Proceso general de reconstrucción de objetos 3D**



1. Generar el patrón de franjas mediante la señal sinusoidal dada por la ecuación (1), obteniendo como resultado una imagen semejante a la Figura 2a. La Figura 2b, muestra la imagen del patrón de franjas generado por la ecuación (1), y así, proyectarlo al objeto [4].

$$I(x, y) = a_0 + b_0 \cos(2\pi f x + \delta) \quad (1)$$

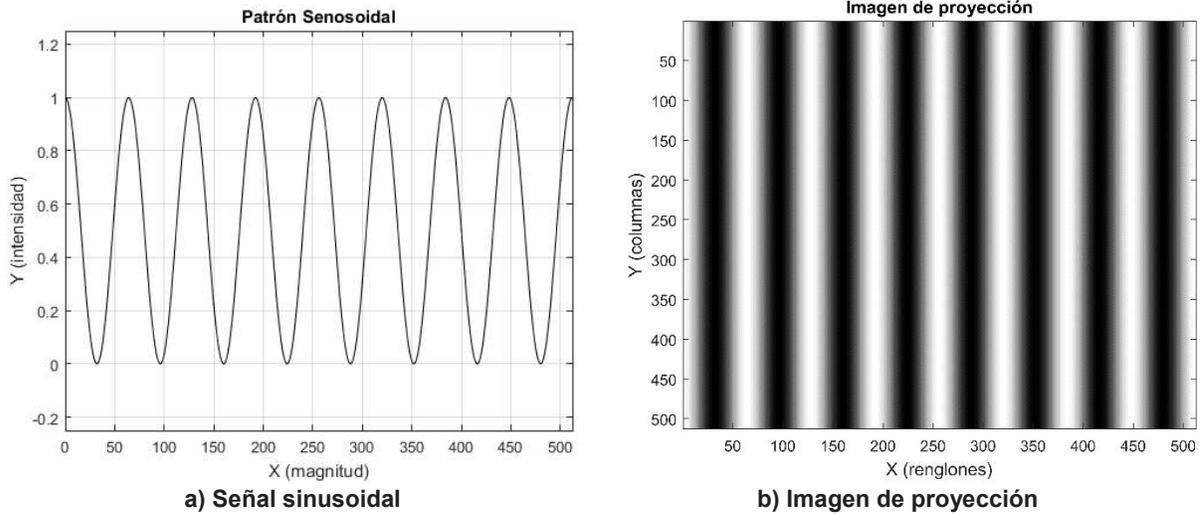


Figura 2. Patrón de franjas

2. Proyectar el patrón generado de la Figura 2b, para ello se emplea un dispositivo de proyección de imagen, en la Figura 3 se presentan 2 ejemplos de dispositivos de proyección que pueden ser empleados para un proyecto de este tipo.



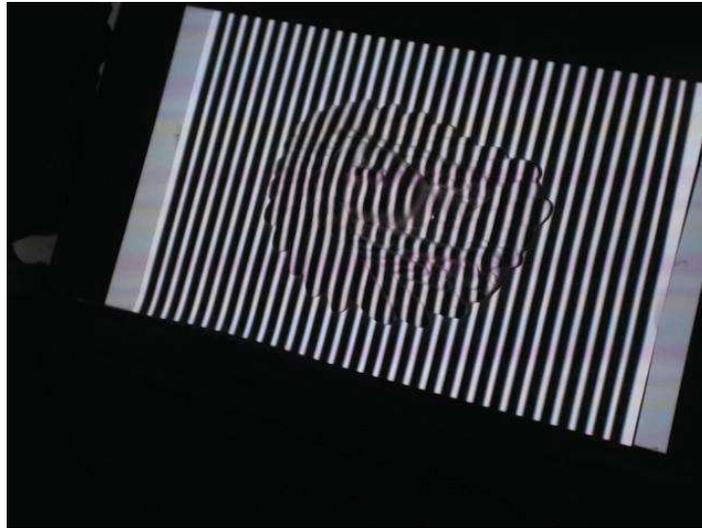
Dell M115HD



Acer k132

Figura 3. Projectores de luz digital DLP

3. Adquirir la imagen donde se aprecie la proyección y deformación del patrón de franjas al tocar el objeto tridimensional, un ejemplo de ello se presenta en la Figura 4.



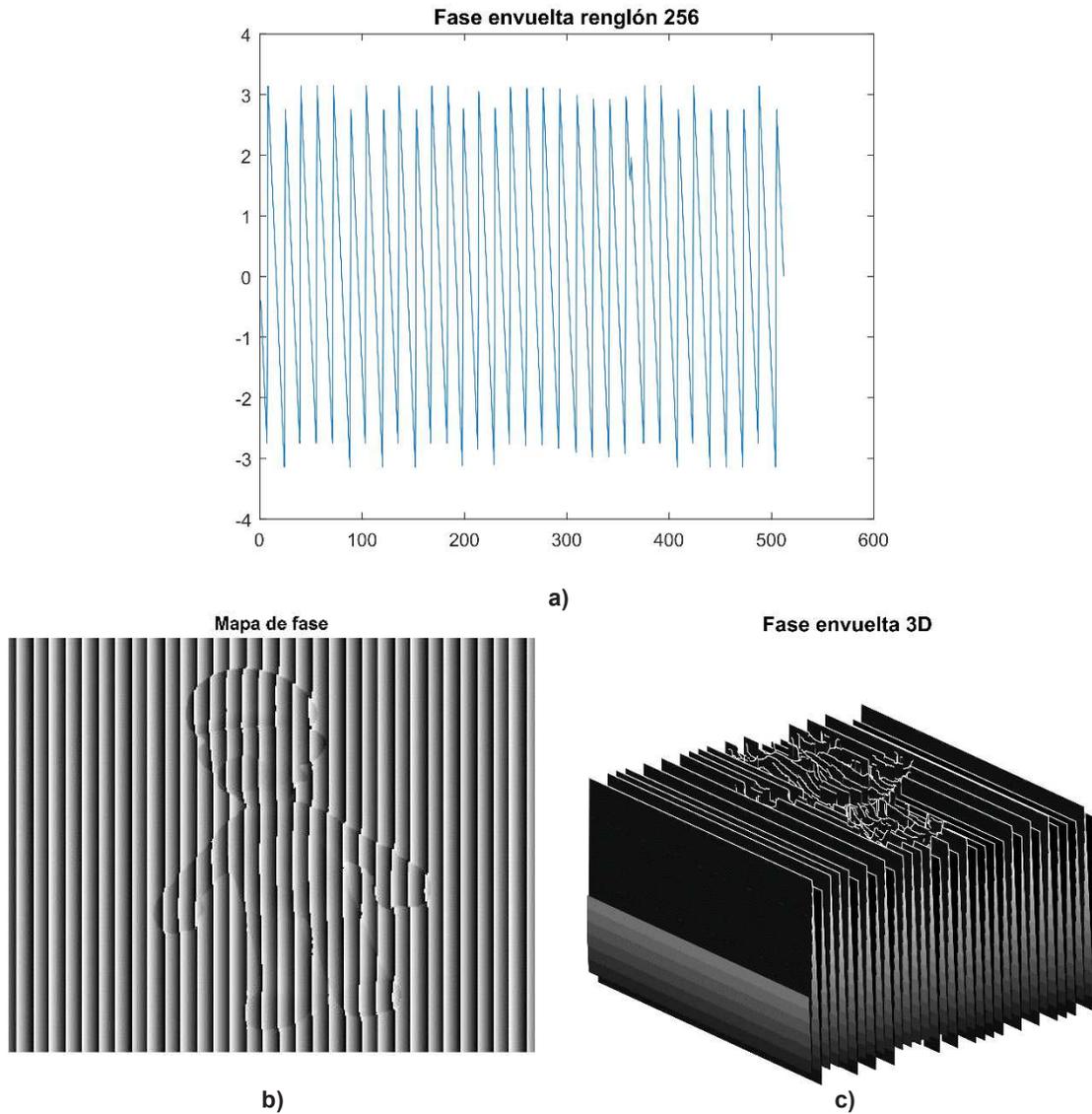
**Figura 4. Proyección de patrón de franjas en objeto real**

4. Calibración de la imagen. Esta etapa requiere de un procesamiento a la imagen, ya que por el lente de las cámaras se produce una deformación natural en la imagen, los patrones presentan una inclinación en el cuadro de la imagen y se requiere que tengan un ángulo de  $90^\circ$ . La Figura 5 muestra un ejemplo de una imagen calibrada [13].



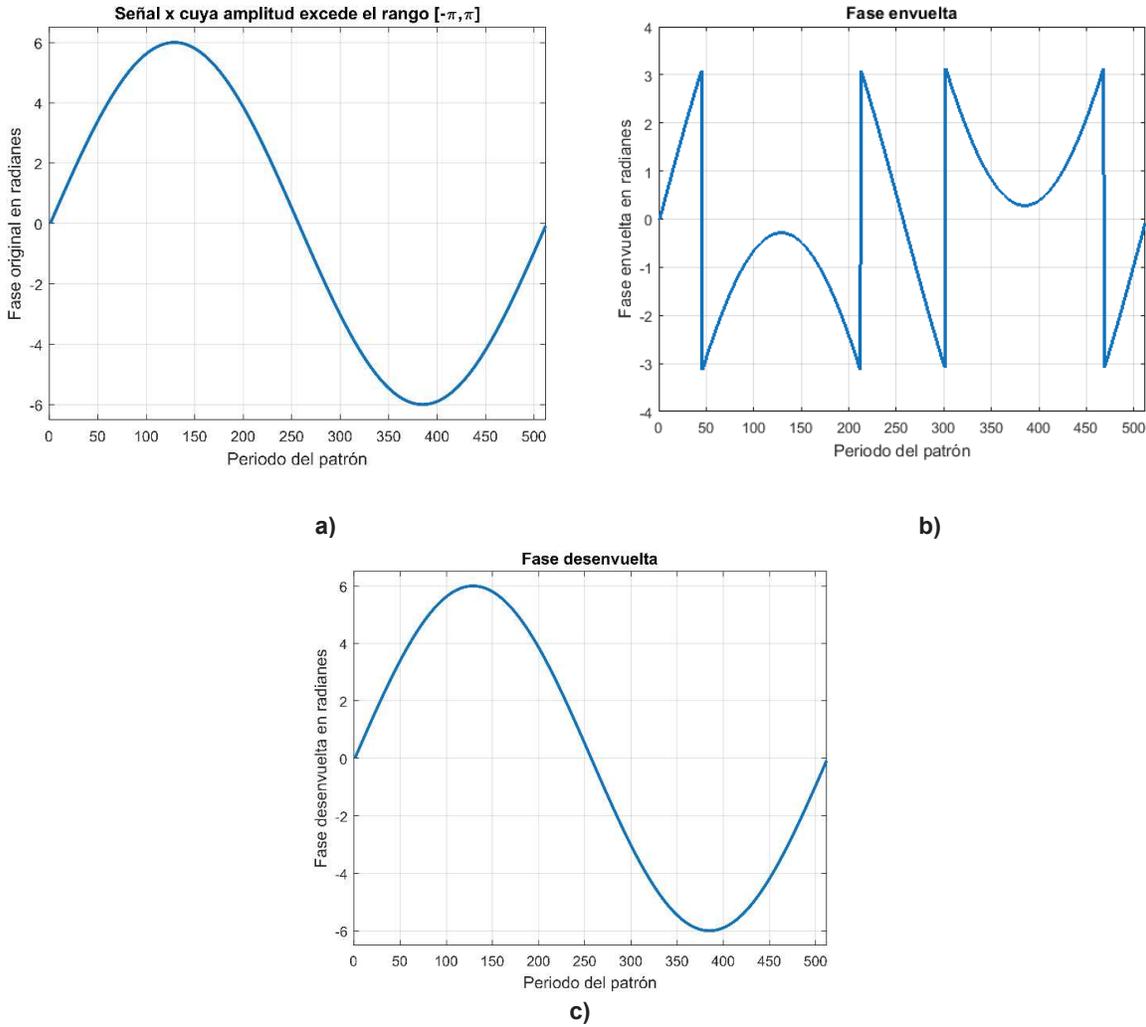
**Figura 5. Ejemplo de una imagen calibrada**

5. Obtención del mapa de fase. Esta etapa depende del método que se aplicará, el método puede ser cualquiera de los anteriormente mencionados, Figura 6.



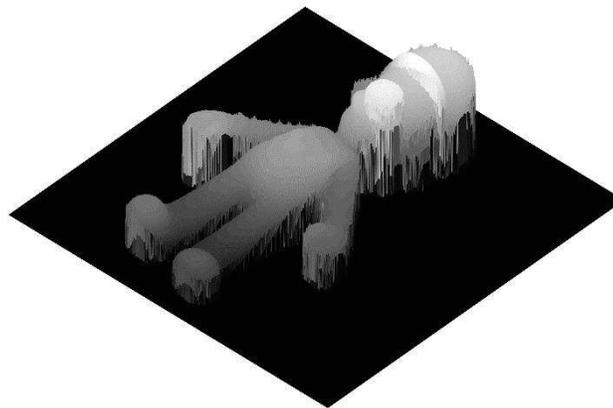
**Figura 6. Ejemplo de fase envuelta. a) Muestra un perfil del mapa de fase del objeto escaneado. b) Mapa de fase en 2 dimensiones. c) Mapa de fase en tres dimensiones**

6. Desdoblamiento de fase. Esta etapa elimina las discontinuidades adquiridas en el mapa de fase, dando como resultado el objeto digitalizado en computadora, Figura 7. Se observa una señal sinusoidal que sobre pasa los valores  $[-\pi, \pi]$ , y al obtener el mapa de fase, está es contenida en el rango de  $[-\pi, \pi]$  y al aplicar el algoritmo de desdoblamiento de fase se eliminan esas discontinuidades obteniendo la forma de la señal original.



**Figura 7. Desenvolvimiento de fase**

- Objeto Virtual. Consta en mostrar el objeto escaneado para posteriormente ser analizado. La representación del objeto es posible apreciarla en un ejemplo que se muestra en la Figura 8. Se observa que el fondo negro es plano, esto es posible restando la fase desenvuelta del plano de referencia de la fase desenvuelta del objeto.





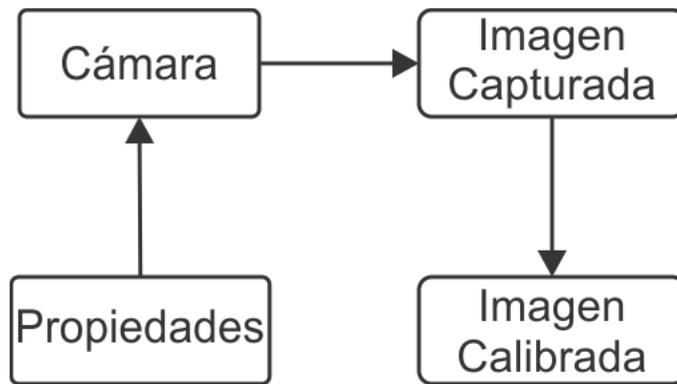
**Figura 8. Representación virtual de un objeto en 3D**

8. Análisis de resultados. Se consideran los resultados obtenidos y la decisión de si el método empleado fue el mejor, o bien, realizar comparaciones entre distintos métodos.

En los últimos años, se ha incrementado el desarrollo de software que proporcione una interfaz gráfica de usuario (GUI), proporcionando una herramienta visual e intuitiva dentro de aplicaciones mecatrónicas, médicas, educativas, entre otros. Debido a lo anterior, en este trabajo se presenta el diseño y desarrollo de una herramienta visual que permite la captura de escenas y la calibración de forma automática. Así mismo, la interfaz permite tener un control o modificación de los parámetros del dispositivo de adquisición de imágenes.

### 3. Resultados

La herramienta desarrollada consta de la etapa de adquisición de la escena, la cual, permite automatizar su captura, almacenamiento y calibración de la imagen. El diagrama general del diseño de la interfaz se presenta en la Figura 9, donde se aprecian los componentes generales del sistema.



**Figura 9. Diagrama conceptual de la interfaz**

1. **Cámara.** Este módulo es compuesto por el dispositivo de adquisición que permitirá visualizar la escena a capturar.
2. **Propiedades.** Se enfoca en las características que es posible manipular para obtener la imagen deseada. La Tabla 2 enlista las características de la cámara Logitech C920 y los parámetros correspondientes. Cabe mencionar que en la tabla se detallan los nombres de las propiedades en inglés, debido a que así se encuentran dentro del programa e información de la cámara. La posibilidad de modificar estas propiedades, permite ajustar la imagen que se desea capturar y establecer la mejor configuración que así lo permita.

**Tabla 2. Propiedades webcam Logitech C920**

Propiedad	Parámetros
Backlight Compensation	Provee una perfecta exposición para un objeto que se encuentra frente a una fuente de luz intensa. <b>ON/OFF</b>
Brightness	Es el aspecto luminoso de un color. Su valor por defecto es 128 en un rango de 0 a 255.
Contrast	Incrementa el cambio de luminosidad entre las zonas más oscuras o más claras. Valor por defecto 128 en un rango de 0 a 255.
Exposure	Es el equilibrio entre la apertura del diafragma para captar correctamente la luz existente. Valores -7 a -1.
Exposure Mode	Este permite calcular la exposición de manera automática o manual. Sus valores corresponden a <b>AUTO/MANUAL</b> .
Focus	Es la propiedad que permite enfocar un objeto dependiendo de la distancia a la que se encuentre. Valor por defecto 0, rango [0, 255]

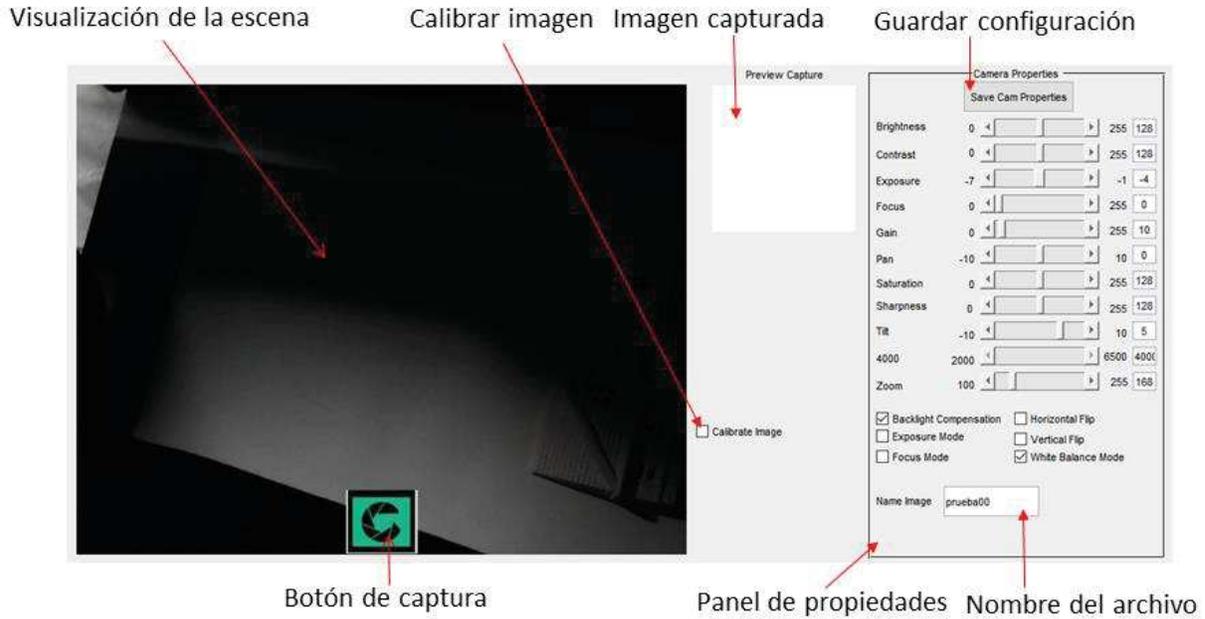


Focus Mode	Define si el foco se calculará automáticamente por el dispositivo, o bien, por el usuario de manera manual.
Gain	Está determinado por la cantidad de luz que admite el lente y cuánto puede reforzarse electrónicamente la señal de video. Es posible que el usuario la modifique si el modo de exposición (Exposure Mode), se encuentra como manual. Rango [0, 255].
Horizontal Flip	Permite reflejar la imagen de manera horizontal.
Pan	Permite cambiar la posición horizontal del lente de izquierda a derecha. Rango [-10, 10]
Saturation	Es la intensidad de un matiz específico, blanco, negro, gris. Valor por defecto 28, rango [0, 255]
Sharpness	Es la cantidad de detalle que se aplicará a la imagen, si este valor es muy bajo la foto saldrá de foco. Si el valor es muy alto, hará más notables los detalles como los bordes de un objeto. Valor por defecto 128, rango [0, 255]
Tilt	Permite cambiar la posición vertical del lente de arriba a abajo. Valor por defecto 0, rango [-10, 10].
Vertical Flip	Permite reflejar la imagen de manera vertical
White Balance Mode	Permite establecer el balance de blancos en modo automático o manual
White Balance	Sirve para equilibrar los niveles de los colores básicos RGB, con el objeto de que la parte más brillante de la imagen aparezca como color blanco, y la menos brillante como color negro. Valor por defecto 4000, rango [2000, 6000].
Zoom	Permite realizar acercamientos a la escena, limitando la zona que será capturada. Valor por defecto 100, rango [0, 255]

3. **Imagen capturada.** Permite observar la escena que se almacenará para su posterior procesamiento como la calibración. Es posible definir el nombre que tendrá el archivo, esto permite tener un mejor control nombrando los archivos a necesidad del usuario.
4. **Imagen calibrada.** Es un proceso en el cual se adquieren imágenes con puntos característicos o de interés con valores conocidos, en los cuales, una vez que son detectados, se realiza una co-relación de los puntos 3D en el espacio contra los valores 2D de la imagen capturada, posteriormente se realiza una transformación geométrica en las cuáles se obtendrá la información corregida de las características deseadas.

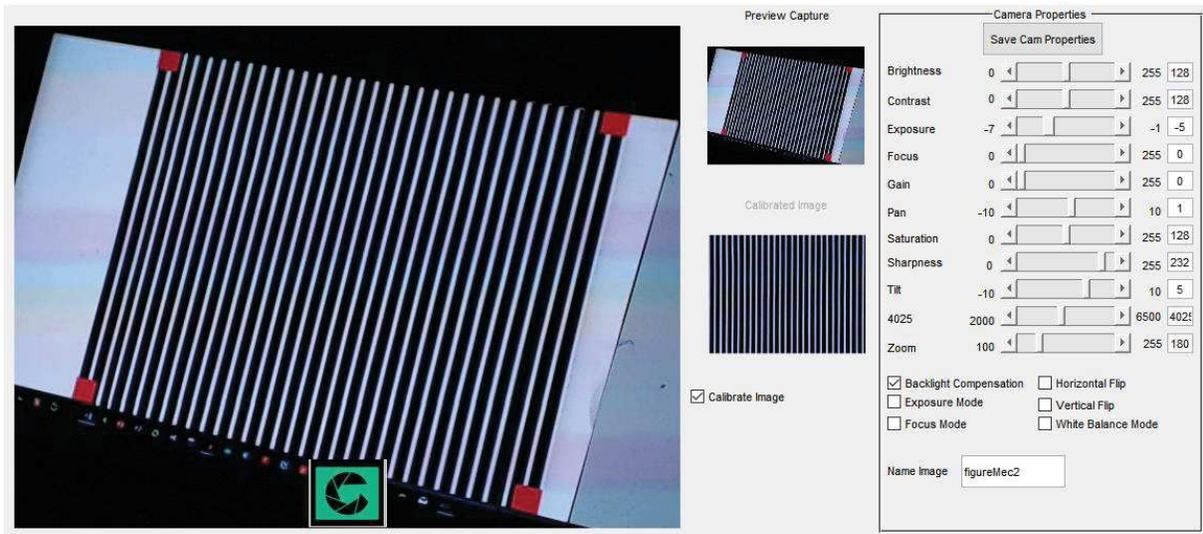
El resultado de la interfaz gráfica se aprecia en la Figura 10, donde se puede observar el área de visualización de la escena acompañada de un botón para realizar la captura. En el momento que el botón de captura es presionado se muestra una visualización en miniatura de la escena etiquetada como "Preview Capture". La interfaz proporciona un componente de tipo check box, este al ser activado proporcionará la imagen calibrada de la imagen capturada. El nombre que reciben las imágenes tanto de captura como de calibración se establece en la caja de texto etiquetada como "Name image". En caso de que la opción "Calibrate Image" esté desactivado, el sistema sólo almacenará la escena sin realizar su calibración.

El componente "Camera Properties", despliega las propiedades que posee la cámara utilizada en este trabajo. Al iniciar el programa, se configuran los valores por defecto. Es posible almacenar la configuración que el usuario establezca de acuerdo a sus necesidades, pulsando el botón "Save Cam Properties", esto permite que una vez establecida una configuración, no sea necesario modificar los parámetros cada vez que se inicia el programa, ya que éste obtendrá los valores almacenados previamente.



**Figura 10. Visualización de la herramienta desarrollada**

La Figura 11 ilustra una de las pruebas realizadas para la captura de una escena. La escena muestra la proyección de un patrón de franjas, su captura y calibración, así como, la configuración de las propiedades de la cámara. En esta prueba se aprecia que las propiedades modificadas son: Exposure Mode = -5, Pan = 1, Tilt = 5 y Zoom = 180. Cabe mencionar que la resolución de la cámara es de 640x480 pixeles, con una profundidad RGB de 24 bit por imagen.



**Figura 11. Prueba Realizada**

Otras capturas realizadas se muestran en la Figura 12, donde se aprecia la imagen con los marcadores para el proceso de calibración, la imagen calibrada y posteriormente se proyecta el patrón de franjas y se realiza la calibración. En total para este trabajo, se escanearon 30 objetos, obteniendo un total de 120 imágenes.

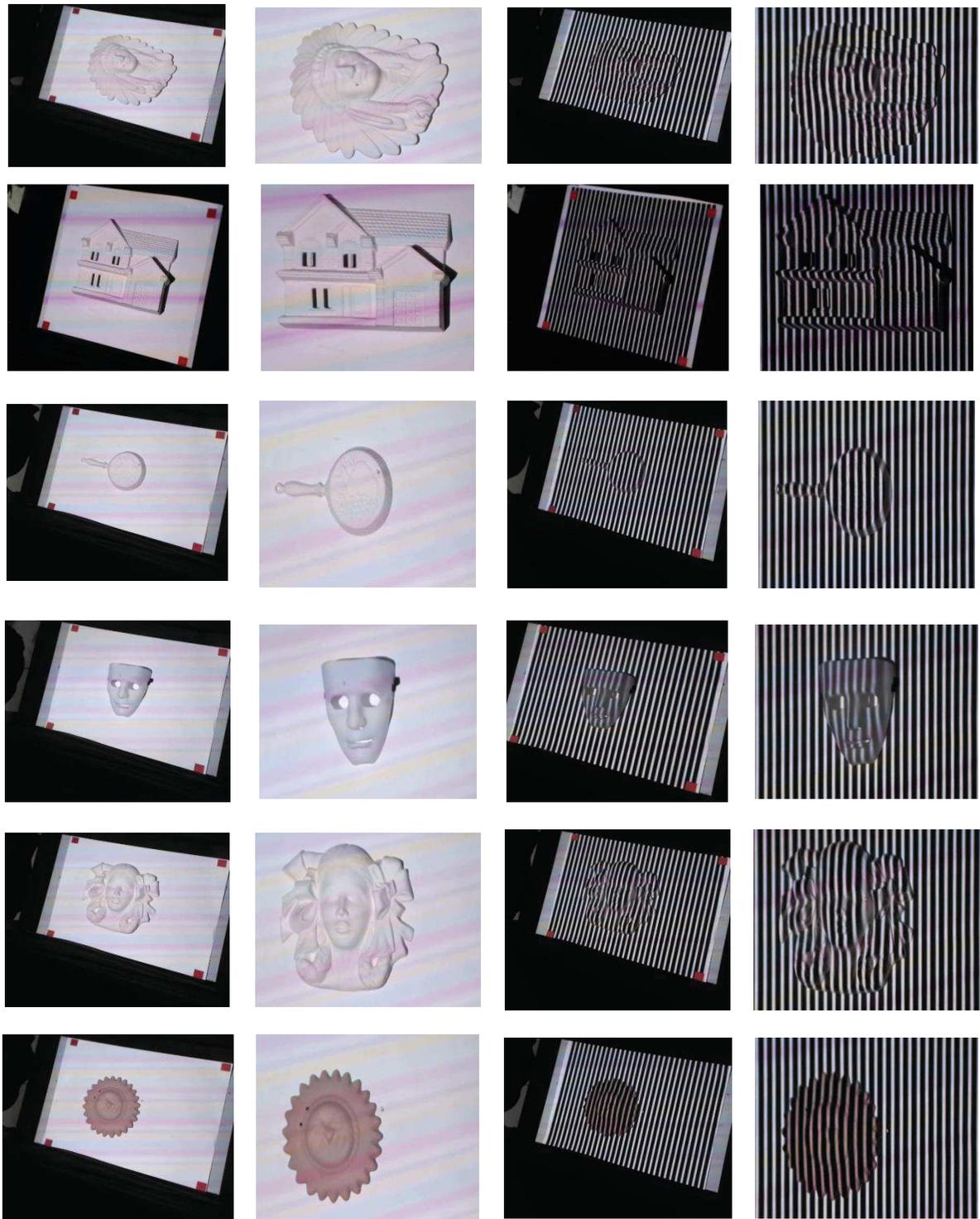


Figura 12. Ejemplos de algunas capturas realizadas con la interfaz gráfica



## 4. Conclusiones

El proceso de calibración de la imagen es una etapa importante en la reconstrucción de objetos 3D, ya que permite que los algoritmos utilizados detecten y reconstruyan las características morfológicas del objeto, simplificando procesos computacionales que en ocasiones son realizados como: filtros o algún pre procesamiento al método seleccionado.

La automatización de las etapas mencionadas en este trabajo, permitió realizar diversas pruebas capturando escenas de diferentes objetos, el uso de la herramienta permitió reducir considerablemente el tiempo de la captura. Se capturaron 30 diferentes objetos en un tiempo aproximado de 30 min, obteniendo 120 imágenes; 4 por objeto ya que se obtiene el plano de referencia y la escena con el patrón de franjas.

Modificar manualmente las propiedades de la cámara, permite al usuario adaptar la imagen de acuerdo a sus necesidades. Para este caso, donde se tiene un ambiente controlado que no permite el paso de luz exterior, el auto foco y la exposición en modo automático, no era posible realizarse de manera correcta por parte de la cámara, por lo que fue necesario modificarlo manualmente con un valor de -5.

Es posible utilizar las imágenes capturadas con cualquiera de los métodos de reconstrucción 3D mencionados en este trabajo, o bien, en cualquier otro no mencionado, siempre y cuando el método seleccionado utilice la proyección de patrones de franjas.

Como trabajo a futuro se propone agregar la generación de los patrones de franjas y su proyección. A la par, incorporar al menos un método de reconstrucción de objetos y algoritmos de desdoblamiento de fase, con la finalidad de tener un sistema integrado aplicado al escaneo y reconstrucción de objetos 3D.

## Referencias

- [1]. Çakir, M. (2013). A graphic user interface for evaluation of the camera parameters. *Computer Applications in Engineering Education*, 21(1), 147-157.
- [2]. Liu, H., Su, W. H., Reichard, K., & Yin, S. (2003). Calibration-based phase-shifting projected fringe profilometry for accurate absolute 3D surface profile measurement. *Optics communications*, 216(1), 65-80.
- [3]. Mao, X., Chen, W., & Su, X. (2007). Improved Fourier-transform profilometry. *Applied optics*, 46(5), 664-668.
- [4]. Zhang, S., & Huang, P. S. (2006). High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement. *Optical Engineering*, 45(12), 123601-123601.
- [5]. Li, B., An, Y., Cappelleri, D., Xu, J., & Zhang, S. (2017). High-accuracy, high-speed 3D structured light imaging techniques and potential applications to intelligent robotics. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 1(1), 86-103.
- [6]. Krishnan, C., Washabaugh, E. P., & Seetharaman, Y. (2015). A low cost real-time motion tracking approach using webcam technology. *Journal of biomechanics*, 48(3), 544-548.
- [7]. Logitech, HD Pro webcam C920, <http://www.logitech.com>, última consulta 27/09/2017.
- [8]. Microsoft, Visual Studio, <https://www.visualstudio.com/es/vs/>, última consulta 27/09/2017.
- [9]. Sourceforge, Dev C++, <https://sourceforge.net/projects/orwelldevcpp>, última consulta 27/09/2017.
- [10]. Oracle, Netbeans, <http://netbeans.org>, última consulta 27/09/2017.
- [11]. Mathworks, Matlab, <https://www.mathworks.com>, última consulta 27/09/2017.
- [12]. Peisen S. Huang and Song Zhang, "Fast three-step phase-shifting algorithm," *Appl. Opt.*45, 5086-5091 (2006)
- [13]. Wang, J., Shi, F., Zhang, J., & Liu, Y. (2008). A new calibration model of camera lens distortion. *Pattern Recognition*, 41(2), 607-615.





# Efecto de la variación del parámetro de escala en la WTP 2D y su efecto en la Reconstrucción 3D de objetos.

López Torres Claudia Victoria<sup>1</sup>, Moya Morales Juan Carlos<sup>1</sup>, Ramos Arreguín Carlos Alberto<sup>1</sup>, Pedraza Ortega Jesús Carlos<sup>2</sup>, Aceves Fernández Marco Antonio <sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Juriquilla, Avenida de las Ciencias s/n, 76229, Querétaro, Querétaro; México.

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario, Cerro de las Campanas s/n, 76010, Querétaro, Querétaro México

## Resumen

*El procesamiento de imágenes ha sido muy explotado en las últimas décadas, y durante este tiempo se han enfrentado diferentes factores tanto internos, como externos que han sido cruciales en el proceso de reconstrucción 3D de objetos. Estas variantes pueden ser tanto externas como internas. Dentro del proceso de captura del objeto y la distorsión que éste pueda presentar en el momento de la captura, existen además, otro tipo de factores que pueden apoyar a mejorar la reconstrucción del objeto, tal es el caso de variaciones dentro de la transformación del método. En este trabajo se toma un objeto con un patrón de franjas distorsionado, dicho patrón es corregido para implementar posteriormente, la Perfilometría Wavelet, usando la transformada Morlet 2D, haciendo una variación en su parámetro de escala con la finalidad de mejorar dicha reconstrucción, esta variación en este parámetro permite visualizar los cambios que se presentan en el mapa de fase del objeto a reconstruir, la variación influye en la calidad del mapa de fase, es decir, si la variación de escala es menor, (seleccionando intervalos pequeños), el mapa de fase presentará menos cambios abruptos. Para obtener la fase desenvuelta se usan dos algoritmos sencillos de desdoblamiento de fase. Al aplicar estos algoritmos se puede observar una diferencia con la misma variación de escala. Con ello se analiza también el desempeño de cada uno de estos algoritmos. Finalmente se puede apreciar con la metodología empleada una mejora en la reconstrucción 3D del objeto.*

**Palabras clave:** Variación de escala, Perfilometría, Transformada Wavelet Morlet 2D, Reconstrucción 3D, Mapa de fase.

## 1. Introducción

La obtención de una mayor precisión y calidad en la medición de objetos 3D ha sido posible gracias al desarrollo científico (métodos matemáticos) y tecnológico (mejora en equipo de cómputo) en las últimas décadas, haciendo accesibles herramientas de cómputo más sofisticadas y con una base teórica más sólida. Las técnicas ópticas de no contacto, incluyen la implementación de métodos básicos de procesamiento digital de imágenes para conseguir resultados satisfactorios. Si se requiere aumentar la precisión es necesario utilizar métodos que proporcionen esa precisión o bien mejorar los existentes. Este proceso de mejora incluye, la modificación del método original, o bien de la adición de etapas que mejoren las características de las imágenes, para que el algoritmo de procesamiento de imágenes tenga un mejor desempeño. Además de la calidad, la consistencia perceptual de los objetos involucrados son factores que pueden afectar los resultados obtenidos dentro del proceso, dependiendo de las circunstancias de captura de dichos objetos [1].

Estos factores pueden ser internos, los cuales involucran: el sistema de captura como funciones de transferencia [2] [3], factor de escala y enfoque [4] [5], incluso la posición del objeto con respecto al sistema de captura. Por otro lado también se involucran factores externos, los cuales refieren al entorno



de iluminación [6] [7], e incluso sombras [8], las cuales afectan considerablemente el proceso de reconstrucción.

La combinación de estos factores (internos y externos), son elementos importantes a ser considerados en el área del procesamiento de imágenes, debido a la necesidad de capturar el objeto con la menor distorsión posible. Partiendo de esta premisa existen investigaciones basadas en métodos enfocados en la proyección de franjas sinusoidales, así como, en la extracción de distorsión de dichos patrones. Estos métodos de reconstrucción 3D, llamados Perfilometría, consisten en la proyección de franjas a través de un proyector sobre un objeto, haciendo posible capturar la distorsión de franjas proyectadas sobre dicho objeto con una cámara [9]. La distorsión de las franjas sobre el objeto es analizado por técnicas que trabajan con tiempo-frecuencia, obteniendo a través de éstas, el mapa de profundidad partiendo de la captura de una sola imagen. Dentro de estas técnicas se encuentran la Perfilometría de Fourier (FTP) [10] y la Perfilometría Wavelet (WTP) [11], la cual será implementada en el presente trabajo. Este análisis de patrones de franjas nos brinda finalmente después de aplicada la técnica, el mapa de profundidad o fase envuelta, el cual tiene contenida la información de la altura del objeto, que será la que finalmente nos brinde, al ser desenvuelta, la reconstrucción. Si este mapa de fase presenta poca distorsión, el resultado de la reconstrucción será limpia, en cambio si este mapa de fase muestra brincos muy abruptos, afectará el resultado de la reconstrucción del objeto.

Existen diversos trabajos enfocados a la fase desenvuelta, haciendo uso de la función wavelet debido a su capacidad de descomponer una señal en sub-señales con diferentes escalas [12], variando los resultados, dependiendo de la wavelet utilizada y sus parámetros. Sin embargo, solo algunos estudios se enfocan en la parte cuantitativa y analítica de dichos parámetros y funciones utilizadas en el proceso. Por ejemplo, [13] presentan un análisis de cálculo del error en los efectos de patrones de franjas no periódicos, mostrando una comparación cualitativa de las discontinuidades de la Transformada Wavelet. [14] muestran el desempeño de la fase, analizando las discontinuidades. [15], Implementando wavelets 1D y 2D, mantienen el error de fase desenvuelta usando la información de amplitud de los coeficientes, limitándolo a las áreas mínimas locales, para la recuperación de fase en un objeto hemisférico. [16], proponen el uso de la wavelet compleja 1D, trabajando con un patrón de franjas proyectado sobre un objeto para obtener la fase envuelta haciendo una amplia variación de los parámetros con diferentes tipos de wavelets. Estos parámetros, tanto la escala como el desplazamiento, son dos conceptos importantes dentro de la Wavelet. La escala es la contracción o estiramiento de la señal y el escalamiento es el proceso del movimiento de la señal, es decir la señal se puede avanzar o retrasar, a lo largo de la longitud de la señal.

El presente trabajo muestra una variación de escalas para observar el comportamiento del mapa de profundidad, con dichas variaciones y como éstas afectan la reconstrucción 3D del objeto, partiendo del mapa de fase obtenido y sus variaciones en la escala, implementando el uso de la transformada Morlet compleja 2D. Determinando con ello, cuál de las variaciones en la escala brinda un menor ruido y por tanto una mejor reconstrucción.

## 2. Wavelet y Factor de Escala

La wavelet es una onda de duración limitada, su análisis se enfoca en descomponer una señal o imagen en ondas de duración variable llamadas wavelets [17] éstas wavelets son vibraciones localizadas de una señal o una imagen. El análisis de multi-resolución es el corazón de la wavelet, y consiste en dividir una señal en sub-señales en niveles de resolución diferente. El proceso de transformación wavelet de una imagen, es aquel donde se toma la imagen final identificando las mejores ondas de escala y se extraen, para generar una imagen menos detallada, posteriormente se determina la escala más fina dentro de la imagen previamente obtenida y nuevamente se extrae para obtener otra vez una imagen con menos detalle y así en lo sucesivo, hasta obtener una imagen con una resolución muy baja; así es como la Transformada Wavelet (WT) crea bloques de información en escala y tiempo con respecto a una señal. La función de escala está representada como:



$$\Psi\left(\frac{x}{s}\right), \quad s > 0 \quad (1)$$

$s$  es el factor de escala, mayor que cero, y determina cuanto se escala una función en el tiempo. Este factor de escala es inversamente proporcional a la frecuencia, es decir que a una escala mayor se obtendrá una frecuencia menor. Lo que esta variación permite es: a un nivel de escala mayor, se obtiene una buena resolución en frecuencia (frecuencia baja) y a una escala menor se obtiene una buena resolución en tiempo (frecuencia alta). Existe una reciprocidad entre la escala y la frecuencia que incluye una constante de proporcionalidad, donde esta constante es conocida como frecuencia central o  $W_0$  de la wavelet. La tendencia asimétrica de onda de la wavelet está definida por la variación de los coeficientes, estableciendo como será reconstruida la señal original. El factor de desplazamiento de la wavelet, es aquel donde el inicio de la wavelet se avanza o se atrasa a lo largo de la longitud de la señal, el cual está representado como:

$$\phi(x - b) \quad (2)$$

esto implica que la wavelet es desplazada y centrada en  $b$ , ello se lleva a cabo siempre que se busque alinear la onda de la wavelet con la característica de la señal que se requiere; es decir, dependiendo de la wavelet que se esté utilizando y de acuerdo a la forma de su onda, esta se desplazara dentro de la señal analizada de tal forma que esta forma encaje con la señal a ser analizada, de ser posible en la mayor parte de la misma, esto garantiza un mejor análisis de la señal.

Una de las clasificaciones de la wavelet es la compleja, esta wavelet tiene como característica trabajar con la parte real e imaginaria de la imagen, las cuales, son necesarias para obtener la información de fase, así como la amplitud, del objeto a ser reconstruido.

### 3. Metodología

En la figura 1, se muestra la metodología propuesta, la cual consta de 8 pasos. En el primer paso se obtiene el objeto con el patrón distorsionado. El segundo paso muestra el objeto capturado con el patrón corregido. La frecuencia  $f_0$  es calculada en el tercer paso, la cual es obtenida por medio del número de franjas proyectadas sobre el objeto que se reconstruirá, es decir, la frecuencia  $f_0$  variará en tanto el número de franjas proyectado sobre el objeto varíe. La  $f_0$  brinda la información que corresponde a la altura del objeto para cada pixel apoyando así, a su reconstrucción 3D.

En el cuarto paso se aplica la transformada Morlet variando sus escalas, (1). El filtro  $f_0$  es aplicado en el quinto paso. La transformada inversa wavelet es obtenida en el sexto paso, es la transformada inversa la que reconstruye la señal original. El mapa de fase es obtenido en el séptimo paso, este mapa contiene la información de profundidad del objeto, misma que se encuentra ente los valores de  $-\pi$  a  $\pi$ . En el octavo paso algoritmos sencillos de desenvolvimiento de fase son implementados para obtener la reconstrucción 3D.

Dentro de la metodología, en el cuarto paso, la función de la transformada implementada es la Transformada Wavelet Continua (CWT) la cual es la suma para toda  $x$  de la señal multiplicada por la escala, y está dada por:

$$W_f(S, \tau) = \int f(x) \psi_{S,\tau}^*(x) dx \quad (3)$$

Esta función es el resultado de una variación de escala y traslación de la señal.

Para el proceso de la Wavelet 2D  $\psi_{a,b,s,\theta}$  se requiere la traslación de  $a$  y  $b$ , en el eje  $x$  y  $y$ , respectivamente, con una dilatación  $s$  y rotación  $\theta$ , partiendo de la wavelet madre  $\psi(x, y)$ , generando con ello, una transformada de cuatro dimensiones, representada como:



$$S(a, b, s, \theta) = \frac{1}{s} \int \int \Psi \left[ \frac{x-a}{s}, \frac{y-b}{s}, r_\theta \right] f(x, y) dx dy \quad (4)$$

Como resultado se obtiene un arreglo complejo de 4 dimensiones [18].

De la Wavelet Gabor madre, se deriva la Wavelet Morlet Compleja 2D, la cual con variaciones suaves en el patrón de franjas presenta un buen desempeño, y está dada por:

$$\psi_M(x, y) = \exp[ik_0(x \cos \theta + y \sin \theta)] \exp\left(\frac{-1}{2} \sqrt{x^2 + y^2}\right) \quad (5)$$

donde  $x, y$  son los índices de los ejes  $x$  y  $y$  respectivamente y  $\theta$  es el ángulo de rotación.

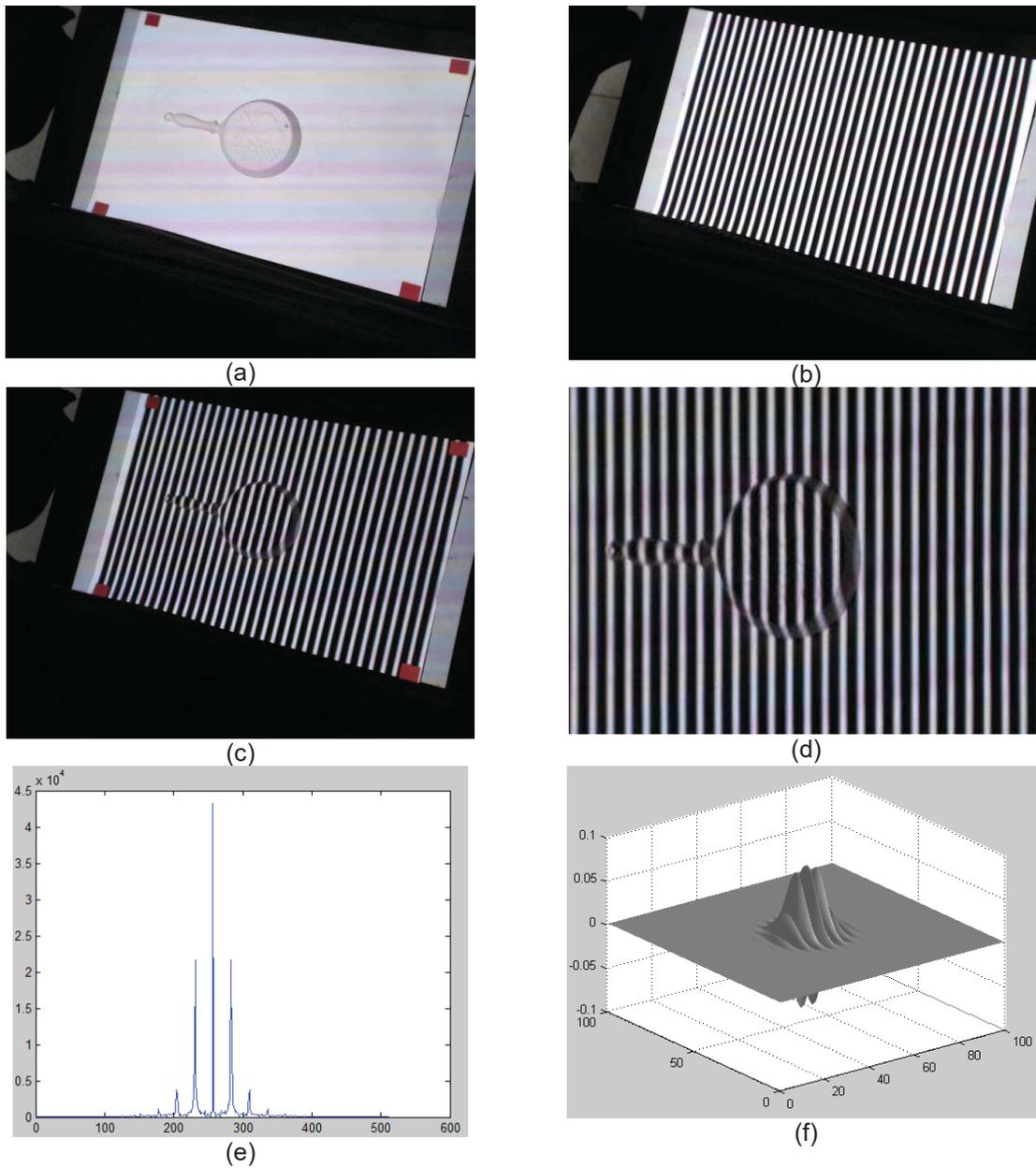
Esta CWT 2D, es la descrita dentro del proceso de la metodología mostrada en el figura 1.



Figura 1. Metodología propuesta.

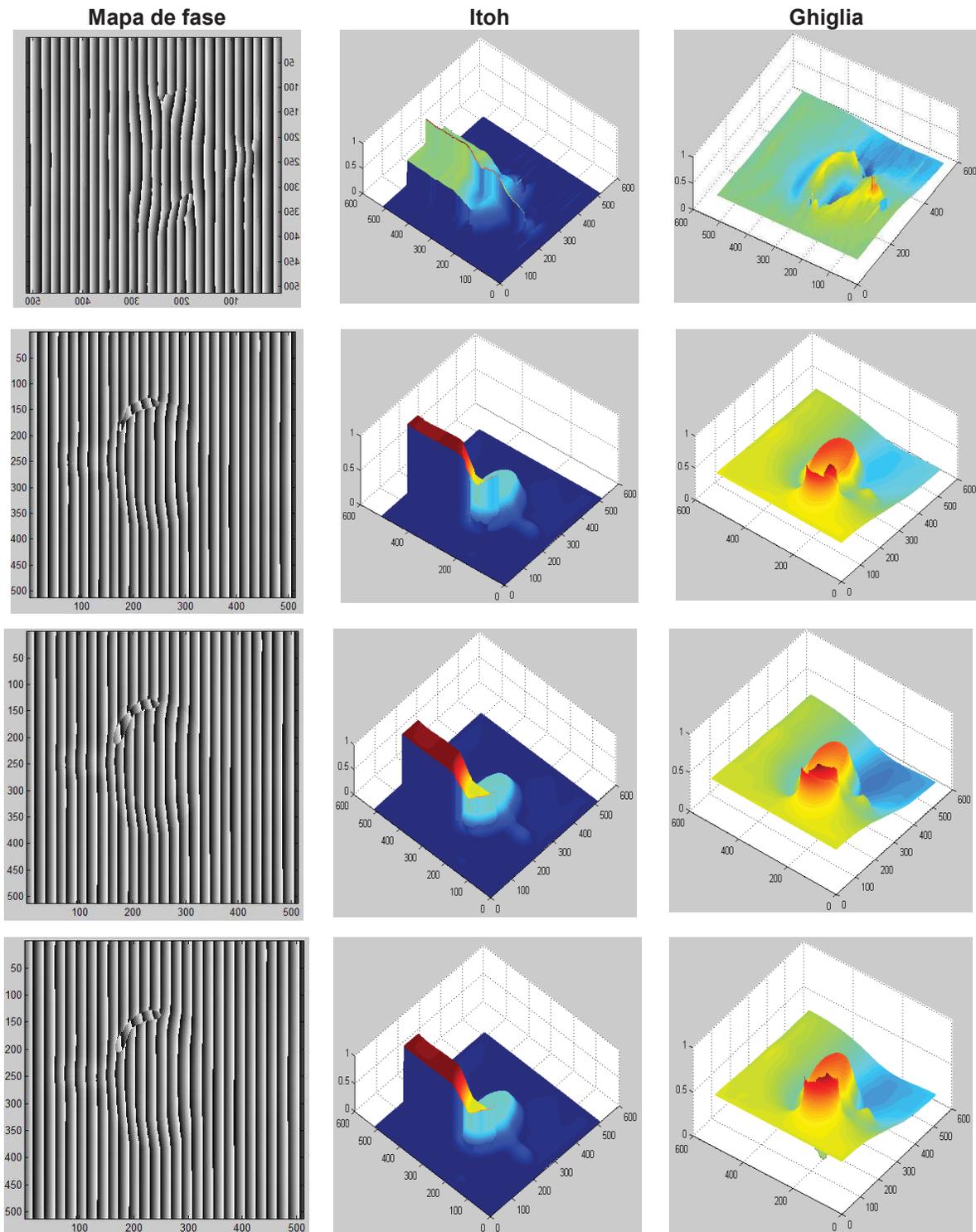
## 4. Resultados

Se aplica la metodología propuesta, considerando un objeto a la entrada del método, en el cual se aplica la corrección del patrón distorsionado, se calcula la  $f_0$ , y se selecciona la Wavelet Morlet para aplicarla dentro de la WTP 2D. Esta parte de la metodología se puede observar en la figura 2.



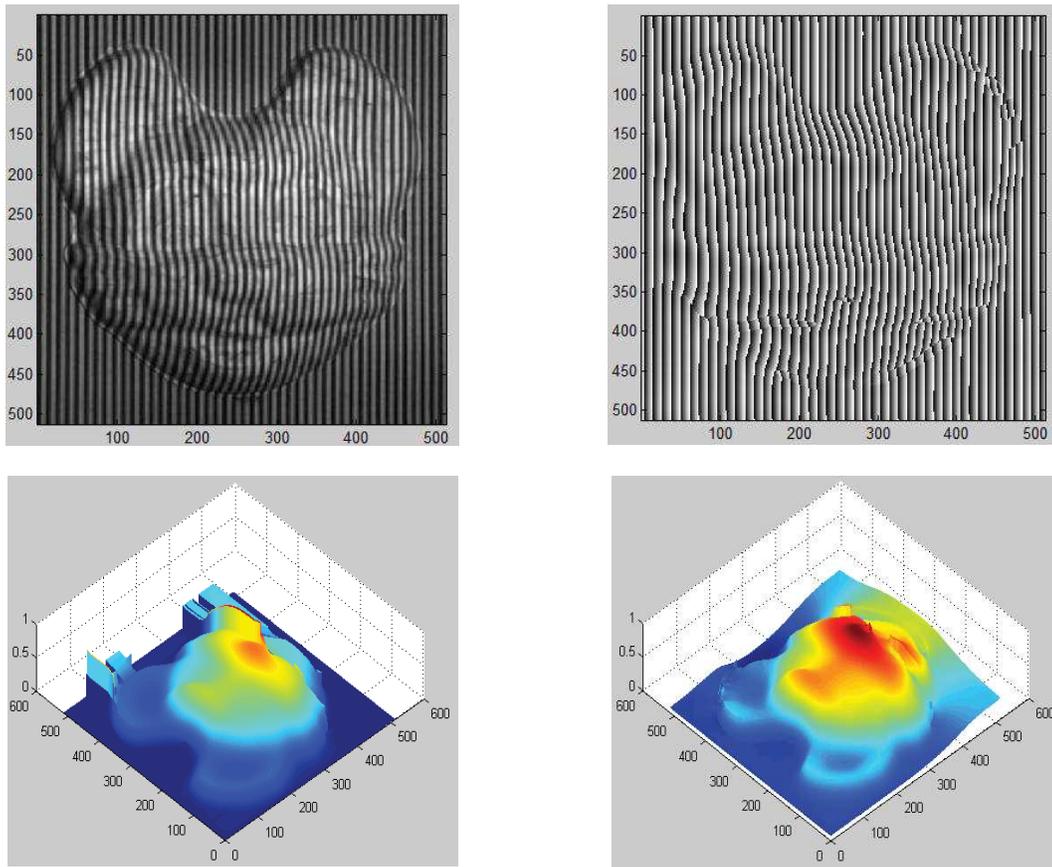
**Figura 2. Resultados de la primera parte de la metodología: (a) objeto a reconstruir, (b) patrón de franjas utilizado, (c) patrón de franjas proyectado sobre el objeto, (d) corrección del objeto con el patrón de franjas, (e) cálculo del número de franjas, en este caso es de 26, y (f) Parte real de la Wavelet Morlet utilizada.**

Posteriormente, dentro del método de WTP 2D (5), se tiene como parámetro de la Wavelet el escalamiento. Para esto se considera como valor máximo el número de franjas proyectado y se propone un paso para la variación de las escalas (1).



**Figura 3. Resultados de la segunda parte de la metodología: la primera columna muestra los mapas de fase, la segunda es el resultado de la reconstrucción 3D del objeto utilizando el algoritmo de Itoh [19], y la tercera columna es la reconstrucción 3D del objeto utilizando el algoritmo de Ghiglia [20], para 2, 8, 16 y 24 intervalos de escala.**

Con esto se obtiene el mapa de fase del objeto y posteriormente se aplican dos algoritmos de desdoblamiento de fase para obtener la altura de los objetos



**Figura 4. Resultados de la segunda parte de la metodología: la primera imagen es el objeto con las franjas proyectadas, la segunda es su correspondiente mapa de fase, la tercera es el la reconstrucción 3D del objeto utilizando el algoritmo de Itoh [19], y la cuarta imagen es la reconstrucción 3D del objeto utilizando el algoritmo de Ghiglia [20], con 24 intervalos de escala.**

En la figura 4 se muestra el proceso de reconstrucción 3D de otro objeto, en este caso una máscara con forma de gato. El algoritmo utilizado detectó que se le habían proyectado 45 franjas al objeto. El mismo procedimiento fue aplicado, aunque en esta ocasión solamente se consideraron 24 intervalos de escala. Se puede observar en esta figura que el método propuesto obtiene un mapa de fase que tiene pocos cambios abruptos (altas frecuencias), y que el resultado de aplicar los dos algoritmos de desdoblamiento de fase producen formas del objeto muy cercanas al valor real del mismo. En lo que respecta al tiempo de procesamiento, el resultado fue de 98.21 segundos, lo cual es similar al obtenido con el tiempo mostrado en la tabla 1, referente a la figura 3

En esta parte de la experimentación se utilizaron exclusivamente algoritmos simples de desdoblamiento de fase, los cuales sirven para recuperar la información de la altura de los objetos.

**Tabla 1. Resultados de la segunda parte de la metodología en relación a los intervalos de escala y el tiempo de procesamiento relacionados con la figura 3.**

Intervalos de escala	Tiempo de procesamiento (seg)
2	25.6
8	44.93



16	60.83
24	101.71

La tabla 1 muestra los resultados del tiempo de procesamiento en relación con los intervalos de escala. El equipo que se utilizó para este artículo tiene las siguientes características; laptop Dell Inspiron 14 R, con procesador Intel Core i7, con 8 Gb de RAM, y como lenguaje de programación se utilizó el MATLAB R2014a.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se implementó un patrón corregido, eliminando la distorsión del patrón de franjas capturado de forma normal, con la finalidad de mejorar el proceso de reconstrucción como primera etapa dentro de la metodología propuesta. La variación del parámetro de escala fue implementado, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 1 para cada intervalo, así como el tiempo representado en segundos, concluyendo que a mayor número de intervalos en la variación de la escala, mejor es la reconstrucción, aunque el tiempo de procesamiento también incrementa. Aunado a esto se pudo observar que se tiene un tope con respecto a la variación de los intervalos en la escala, es decir; se llega a un punto en donde la diferencia con respecto a la mejora en la reconstrucción del objeto ya no varía de forma considerable. Por ello se concluye que es preferible tener un tiempo menor, con una variación de escala que genere un buen resultado considerando también el mejor tiempo. Para el desdoblamiento de fase fueron utilizados los algoritmos de Itoh y Ghiglia, se puede observar que es el algoritmo de Ghiglia el que tiene un mejor desempeño para el objeto presentado en este trabajo.

## Referencias

- [1] Stockham, G. Image Processing in the Context of a Visual Model. Proc. IEEE, 60(7):828-842, 1972.
- [2] Sobol, R. Automated Image Calibration. Patent US5185673, 1993.
- [3] Devlin, K., & Chalmers, A. Visual Calibration and Correction for Ambient Illumination. ACM Transactions on Applied Perception, 3(4): 429-452, 2006.
- [4] Lenz, R., & Tsai, R. Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3D machine vision metrology. International Conference on Robotics and Automation Proceedings, 1987.
- [5] Beardsley, P., Murray, D., & Zisserman, A. Camera Calibration Using Multiple Images. European Conference on Computer Vision, 312-320, 1992.
- [6] Gross, R., & Brajovic, V. An Image Processing Algorithm for Illumination Invariant Face Recognition. In International Conference on Audio and Video-Based Biometric Person Authentication, 10-18, 2003.
- [7] Zhang, T., Tang, Y., Fang, B., Shang, Z., & Liu, X. Face Recognition Under Varying Illumination Using Gradientfaces IEEE Transactions on Image Processing. 18(11):2599-2606, 2009.
- [8] Salvador, E., Cavallaro, A., & Ebrahimi, T. Cast shadow segmentation using invariant color features. Computer Vision and Image Understanding, 95: 238-259, 2004.
- [9] Asundi, A., & Wensen, Z.: Fast phase-unwrapping algorithm based on a gray-scale mask and flood fill. Applied optics, 37(23), pp. 5416-5420, 1998.
- [10] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. Applied optics; 22(24):3977-3982, 1983.
- [11] Zhong, J., & Weng, J. Spatial carrier-fringe pattern analysis by means of wavelet transform: wavelet transform profilometry. Applied optics, 43(26):4993-4998, 2004.
- [12] Gdeisat M A, Abid A, Burton D R, Lalor M J, Lilley F, Moore C, Qudeisat M. Spatial and temporal carrier fringe pattern demodulation using the one-dimensional continuous wavelet transform: recent progress, challenges, and suggested developments. Optics and Lasers in Engineering; 47(12):1348-1361, 2008.



- [13] Gorthi, S., S., Lolla, K., R.: Wavelet transform analysis of truncated fringe patterns in 3D surface profilometry. Proc SPIE, 5856, pp. 265-273, 2005.
- [14] Quan, C., Chen, W., Tray, C.: Phase-retrieval techniques in fringe projection pro-filometry. Optical and Lasers Engineering, 48, pp. 235-43, 2010.
- [15] Li, S., S., Su, X., Y., Chen, W.: Spatial carrier fringe pattern phase demodulation by use of a two dimensional real wavelet. Appl Opt, 48, pp. 893-906, 2009.
- [16] Lopez, C. V., Pedraza, J. C., Ramos, J. M., Silva, E. G., & Hurtado, E. G. Parameter Characterization of Complex Wavelets and its use in 3D Reconstruction. In Mexican International Conference on Artificial Intelligence pp. 471-481. Springer, Cham, October 2016.
- [17] Walker, J. S.: A primer on wavelets and their scientific applications. CRC press, 2008.
- [18] Lopez, C. V., Pedraza, J. C., Talavera V. D., Gorrostieta H. E., Vargas J. E. Análisis de la Perfilometría Wavelet 2D en su Desempeño para la Reconstrucción 3D de Objetos. La Mecatrónica en México, Vol. 6 No. 2 pp. 36-45, Mayo 2017.
- [19] Itoh, K. Analysis of the phase unwrapping algorithm. Applied Optics, 21(14): 2470-2486, 1982
- [20] Ghiglia, D. C., & Pritt, M. D. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software (Vol. 4). New York: Wiley, 1998.





# Sistema mecatrónico de perforación de placas de circuito impreso

Torrijos Pérez Lizandro<sup>1</sup>, Ramos Arreguin Juan Manuel<sup>2</sup>(✉), Dimas Talavera-Velázquez<sup>2</sup>, Juvenal Rodríguez Reséndiz<sup>2</sup>, Jesús-Carlos Pedraza-Ortega<sup>2</sup>

TSU en Mecatrónica Área Automatización<sup>1</sup>, Universidad Tecnológica de San Juan del Río, Av. La Palma No. 125, Col. Vista Hermosa, San Juan del Río, Querétaro, México.

Facultad de Ingeniería<sup>2</sup>, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de Las Campanas, s/n, Las Campanas, Cerro de Las Campanas, s/n, Las Campanas.

✉jsistdig@yahoo.com.mx

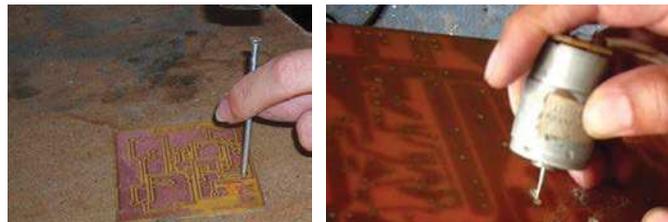
## Resumen

*Uno de los principales problemas a los que se enfrenta un estudiante del área de mecatrónica, especialmente cuando se tiene la necesidad de diseñar un circuito impreso, es la fabricación del mismo. En este trabajo, se presenta el diseño de una máquina para perforar placas de circuito impreso, de una manera más amigable y con menos probabilidades de romper la broca correspondiente. El diseño consta del desarrollo de un sistema mecánico y programación de un microcontrolador. El sistema mecánico diseñado es un sistema basado en un plano cartesiano, con 3 grados de libertad, en los ejes X, Y, Z. Estos ejes son manipulados mediante motores a pasos para su movilidad lineal. Este sistema permite realizar la tarea de perforación de una manera más controlada, y con menor error, cuidando que la broca no se rompa tan fácilmente como cuando se realiza de manera manual. Se tiene un ahorro considerable de tiempo al utilizar un sistema como el propuesto.*

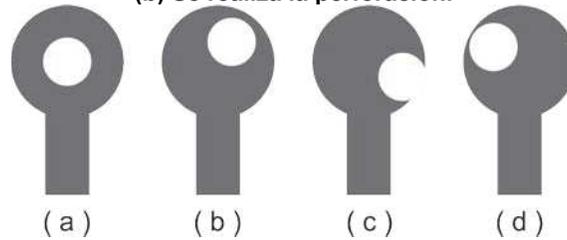
**Palabras clave:** PCBs, sistema mecánico, plano cartesiano, diseño.

## 1. Introducción

En el ambiente estudiantil, y en ocasiones en algunas empresas, se trabaja en el desarrollo de placas de circuito impreso (PCB), para la solución electrónica de diversos problemas. Una vez que se tiene un diseño, se debe fabricar la placa de cobre, lo cual incluye la perforación del PCB, para la colocación de componentes o algún otro elemento. En ocasiones se puede mandar fabricar, o utilizar equipos que de manera automática pueden realizar la fabricación, incluyendo las perforaciones. Sin embargo, en ocasiones urge la placa, o bien, no se cuenta con los recursos económicos para una fabricación rápida de la misma. Especialmente si hablamos de estudiantes, resulta muy caro mandar a realizar las placas, por lo que generalmente, se requiere realizar las perforaciones de manera manual, lo que tiene generalmente como consecuencia una inversión de tiempo, así como el riesgo de realizar mal la perforación. La figura 1 muestra dos maneras incorrectas de realizar la perforación, pero en muchas ocasiones necesarias.



**Figura 1. Maneras de realizar la perforación de una placa de circuito impreso. (a) Se marca la perforación. (b) Se realiza la perforación.**



**Figura 2. Formas correctas e incorrectas del resultado de perforar una PCB. Solamente es correcto el (a).**

Existen maquinas tales como: CNC de perforación fresadora para madera de metal pcb, 600x400mm, 6040Z-VFD1.5KW USB 3axis cnc router [1]. Mini cnc fresadora para trabajar la madera router taladro talla grabador de corte pcb, 390 × 280mm, CNC 3040Z-DQ [2]. CNC enrutador máquina grabador/cnc de enrutamiento de la máquina se utiliza para la madera/enrutador cnc de mármol, 400x400mm, ELE 4040 [3]. Máquina cnc de Perforación PCB, 300X200mm, LYCNC3020Z-D500W, que realizan PCBs [4]. Pero estos sistemas suelen ser muy costosos.

Para los estudiantes llega a ser muy complicado contar con un equipo de este estilo, principalmente por el costo que implica el comprar una de estas máquinas, también llegan a existir lugares donde rentan las máquinas para los estudiantes, pero de igual forma suelen ser muy costosas ya cobran por el tiempo que se utiliza la máquina.

Por otra parte, existen proyectos ya antes realizados que utilizan el principio esencial el cual se podría llegar a utilizar como: Computer Numerical Control-PCB Drilling Machine with Efficient Path Planning– Case Study\_2. En las máquinas de perforación de placas de circuito impreso (PCB), la ubicación de los taladros se introduce en la máquina y el PCB se perfora en las coordenadas correspondientes, este documento propone un enfoque, que se basa en el Algoritmo de búsqueda de ruta más corta (SPSA), para encontrar la ruta óptima en los agujeros de PCB proceso de perforación [1]. Automatic Milling Machine, Este proyecto es el desarrollo de una fresadora automática de bajo costo que es capaz de operación interpolada simultánea de 2 ejes. El menor coste se logra mediante la incorporación de las características de una interfaz de PC estándar con un sistema basado en microcontrolador, en un sistema integrado basado en Arduino. [2]. PCB ENGRAVING AND DRILLING MACHINE, El modelo desarrollado se compone de la tabla de direcciones XYZ, donde XY para la posición en el territorio de grabado y el concentrador Z para configurar poco perforador. El tablero de Arduino se ha escogido como regulador. Los desarrollos de la máquina son creados por motores paso a paso. La máquina de control numérico de PC será utilizada y controlada por una técnica de control creativa que cambia sobre el dialecto de máquina CNC (código G) en un tipo de dialecto de programación C funciona a pesar de esto hay un circuito electrónico que comprende un chip de microcontrolador y controladores de motores [3].

En general, es muy complicado que un estudiante cuente con un equipo de bajo costo para una fabricación más rápida de una placa PCB. Este trabajo busca desarrollar una máquina tipo CNC para realizar la perforación de una placa de circuito impreso de una manera más segura y rápida. El proyecto ha sido dividido en etapas, y en esta primer etapa se busca contar con la máquina, y que el movimiento se realice de manera manual. En próximos trabajo se va a desarrollar la parte automática.

## 2. Metodología

La metodología está basada en un proceso de diseño de proyectos mecatrónicos. LA figura 2 muestra a grandes pasos la metodología empleada en el desarrollo del presente trabajo. El proceso inicia en la comprensión del problema, pasando por el diseño mecánico, el diseño del hardware



necesario, fabricación, ensamble y las pruebas, concluyendo con una retroalimentación del sistema. Esto se puede apreciar en la figura 3.

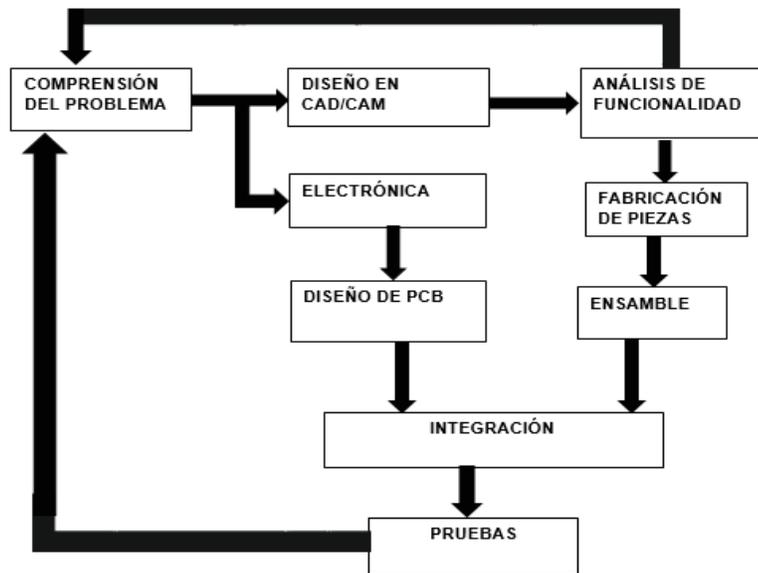


Figura 3. Diagrama a bloques de la metodología empleada.

### **2.1 Comprensión del problema**

Se requiere desarrollar un sistema mecatrónico que permita facilitar la tarea de perforación de PCBs, teniendo como resultado perforaciones correctas, y evitando que las brocas se rompan continuamente. En esta primera etapa, la máquina se mueve de manera manual, utilizando el microcontrolador con una interfaz de botones para colocar el extremo de la broca en el punto donde se desea perforar. En etapas posteriores, se va a trabajar el diseño del software para interpretar archivos Gerber que contengan la información de perforación, para que el proceso sea automático.

### **2.2 Diseño en CAD/CAM**

En esta parte de la metodología se utilizan herramientas de diseño de software, para diseñar la estructura mecánica, y tener una presentación visual del diseño, para simular la funcionalidad. Existe una gran variedad de software CAD/CAM, que se caracterizan por su entorno intuitivo y por disponer de herramientas de diseño fáciles de utilizar, todo integrado para facilitar el desarrollo de sus proyectos, donde se hace el diseño de cada una de las piezas que se utilizan en el ensamble final del sistema mecánico a desarrollar.

### **2.3 Análisis de funcionalidad**

Este análisis nos permite realizar correcciones de funcionamiento del sistema mecánico revisando posibles errores que podrían surgir e irlos proponiendo mejoras para resolver el error. Para esto se realiza un proceso de evaluación. El diseño ha sido modificado diversas ocasiones hasta lograr la funcionalidad deseada.

### **2.4 Fabricación de piezas**

En este parte del proceso, se toma la decisión de utilizar aglomerado tipo MDF, de un espesor de 5.5 mm. Lo anterior, es para obtener un primer prototipo, que permita evaluar la funcionalidad real, y en caso de ser satisfactorio, considerar la fabricación de piezas con metal. El corte de las piezas en MDF es realizado en la UAQ, en las instalaciones del CEDIT.

El material MDF es un tablero de Densidad Media o Tablero DM es un aglomerado elaborado con fibras de madera aglutinadas con resinas sintéticas mediante fuerte presión y calor, en seco, hasta alcanzar una densidad media. Este material presenta una estructura uniforme y homogénea y una textura fina que permite que sus caras y cantos tengan un acabado perfecto. Se trabaja prácticamente igual que la madera maciza, pudiéndose fresar y tallar en su totalidad.

## 2.5 Ensamble

El ensamble mecánico implica el uso de diferentes métodos de sujeción para sostener en forma mecánica dos o más partes. En la mayoría de los casos, los métodos de sujeción implican el uso de componentes de equipo por separados (sujetadores), que se agregan a las partes durante el ensamblado. Los métodos de sujeción mecánica se dividen en 2 clases principales. (Silvia W,J, Ensamble mecánico, 2012)

- Permiten desensamblar. Sujetadores roscados (pernos, tornillos y tuercas).
- Unión permanente (remaches).

En esta etapa se arma la estructura mecánica, de acuerdo al diseño realizado, así como el montaje de los motores para poder realizar las pruebas de funcionalidad necesarias.

## 2.6 Electrónica

En esta ocasión se usa un microcontrolador ATmega32U4, para controlar el movimiento de 3 motores a pasos bipolar modelo 17HS2408, 1.8° por paso, con un consumo de corriente de 0.6 A, así como para la activación de la herramienta de corte.

### 2.6.1 Motores a pasos

Hay varios tipos de motores a pasos que pueden ser usados: de imán permanente, de reluctancia variable e híbridos; los más usados para proyectos sencillos son los de imanes permanentes. Hay dos tipos de motores a pasos de imanes permanentes: unipolares y bipolares.

#### 2.6.1.1 Motores unipolares

Estos motores utilizan dos bobinas con derivación central, como se muestra en la figura 4. Las derivaciones centrales se conocen como “comunes”, y se conectan a la alimentación principal, de acuerdo con el voltaje de cada motor. Se reconocen por el número de cables, pues pueden tener 5 o 6 cables, dependiendo si internamente se conectan o no. Esto se puede ver en la figura 4(a) y figura 4(b).

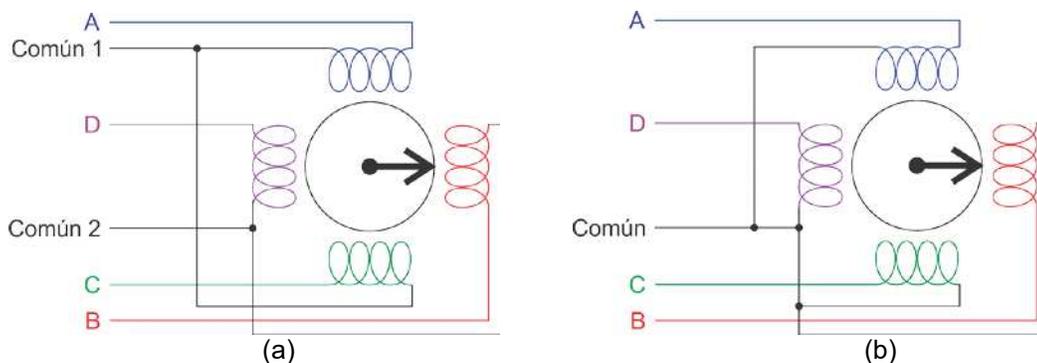


Figura 4. Motor unipolar. (a) 6 hilos. (b) 5 hilos.



### 2.6.1.2 Motores bipolares

Este tipo de motores a pasos se forma de dos bobinas sin derivación central, por lo que únicamente tienen 4 cables para la activación de cada bobina por separado. La figura 5 muestra la estructura de un motor a pasos bipolar.

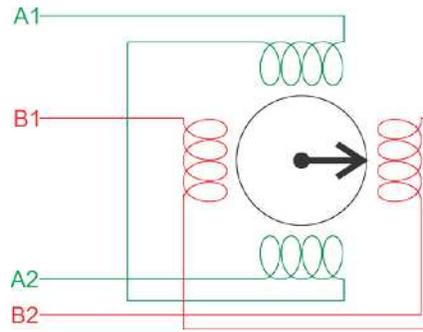


Figura 5. Motor bipolar.

Tabla 1. Comparación entre motor bipolar y unipolar . (Technirama, “como funcionan los motores”)

Motores bipolares	Motores unipolares
Mayor torque	Menor torque
Mayor anclaje debido a los embobinados	Menor anclaje
Mas pequeño	Tiene un mayor volumen
Mas barato	Mas caro
Control mas complicado	Control mas sencillo

### 2.6.2 Optoacopladores

Un optoacoplador es un dispositivo semiconductor que contiene un dispositivo emisor de infrarrojos (foto-emisor), y un foto-receptor que utiliza la luz emitida por el emisor para actuar como interruptor. El foto-receptor puede ser un transistor, un SCR, un TRIAC, entre otros. Estos dispositivos utilizan la luz para hacer el cambio de estado y activar o desactivar una carga. Se usan principalmente para el aislamiento entre etapas de potencia y etapas de procesamiento digital.

### 2.7 Diseño de PCB

Se usa el software Proteus que está compuesto básicamente por 2 programas principales: Isis, que se utiliza para el diseño del esquema electrónico, y Ares, que sirve para el diseño de la placa de un circuito impreso a partir del esquema electrónico.

ISIS. Es la herramienta para la elaboración avanzada de esquemas electrónicos, que incorpora una librería de más de 6.000 modelos de dispositivos digitales y analógicos. (Gallardo, 2015)



ARES. Es la herramienta para la elaboración de placas de circuito impreso con posicionador automático de elementos y generación automática de pistas, que permite el uso de hasta 16 capas. Con ARES el trabajo duro de la realización de las placas de circuito impreso recae sobre el PC en lugar de sobre el diseñador. (Gallardo, 2015)

### **2.8 Integración**

En este punto se implementa el sistema mecánico con el circuito digital y de potencia, para realizar las pruebas correspondientes de movimiento.

### **2.9 Pruebas**

Después de implementar la programación y al sistema mecánico y eléctrico se realizan unas pruebas donde se obtuvo información importante que nos servirán para la próxima mejora, por ejemplo, su funcionamiento es bueno, pero debido a la precisión de los motores a pasos y la separación entre cuerda del tornillo sin fin se espera que su desplazamiento se demasiado lento.

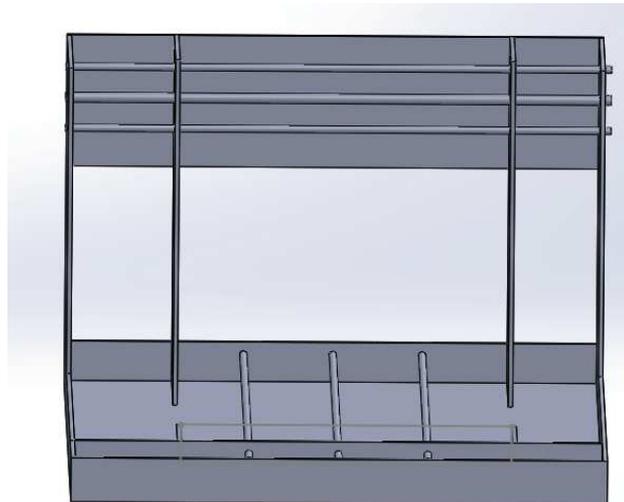
## **3. Desarrollo del sistema**

### **3.1 Comprensión del problema**

Se realiza un sistema mecánico y electrónico que sea capaz de controlar 3 motores a pasos marca Nema 17, los cuales tendrán el objetivo de realizar la perforación de PCBs utilizando un sistema mecánico basado en 3 ejes de movimiento (X, Y, Z). Los movimientos pueden ser programados en base a un listado de coordenadas para la ubicación de los puntos.

### **3.2 Diseño en CAD/CAM**

Después de entender el problema a resolver y de tener todas las especificaciones y características con las que debe contar se realiza el siguiente diseño mostrado en la figura 7.



**Figura 7. Sistema mecánico diseñado.**

### **3.3 Fabricación de piezas**

**Para la elaboración de las piezas se utiliza un aglomerado de madera tipo MDF de 5.5 mm de espesor el cual se trabajó en las instalaciones de la UAQ Facultad de Ingeniera, en el**

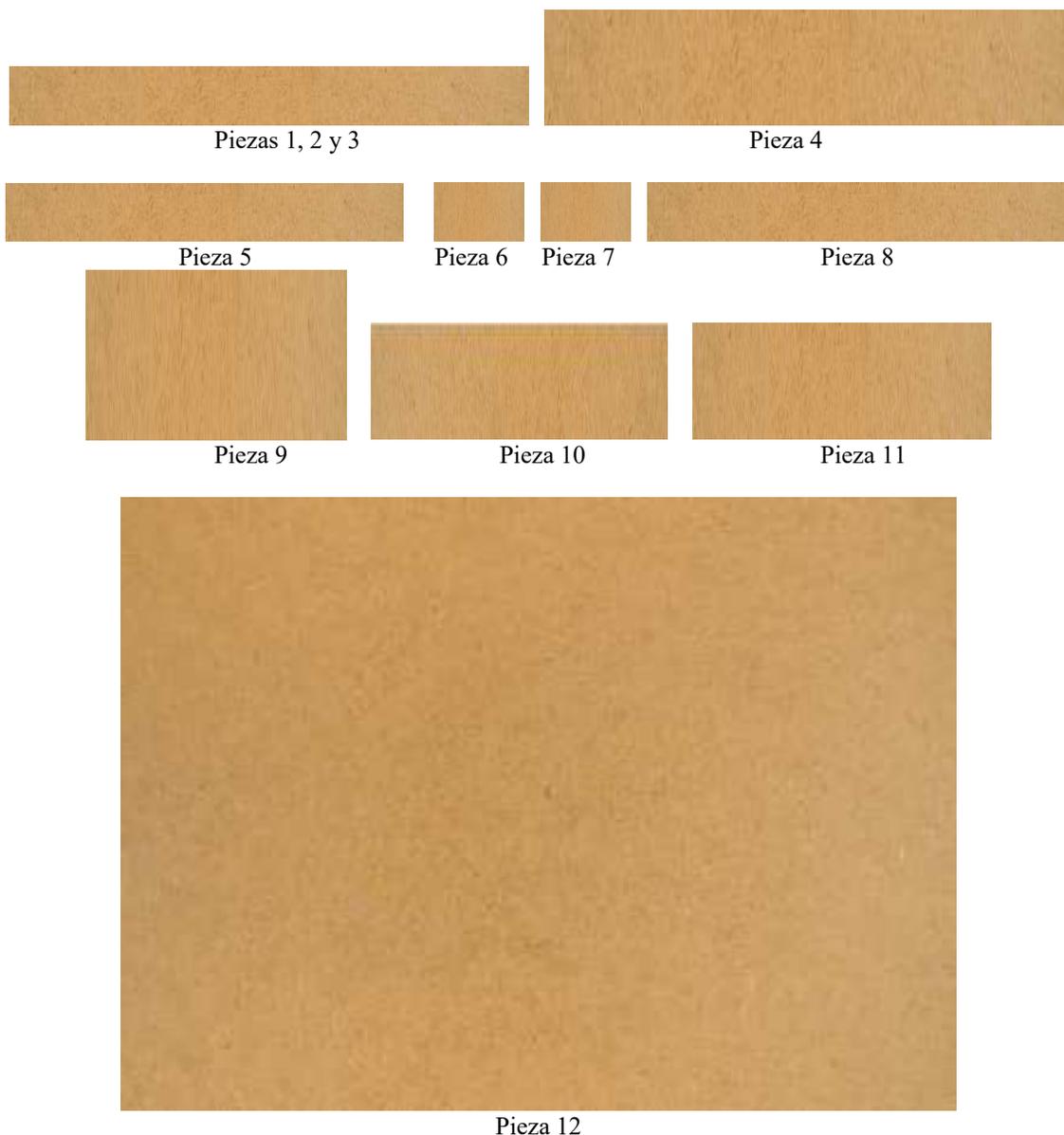


**edificio CEDIT donde se proporcionó la ayuda y guía adecuada para su fabricación y corte de las piezas en las mismas instalaciones.** Posteriormente se podría utilizar una maquina CNC para la fabricación en aluminio o algún otro material. Para el desarrollo del prototipo se fabricaron las piezas que se muestran en la figura 8, las cuales forman parte de la base principal que contiene el eje X y Y de la máquina diseñada.

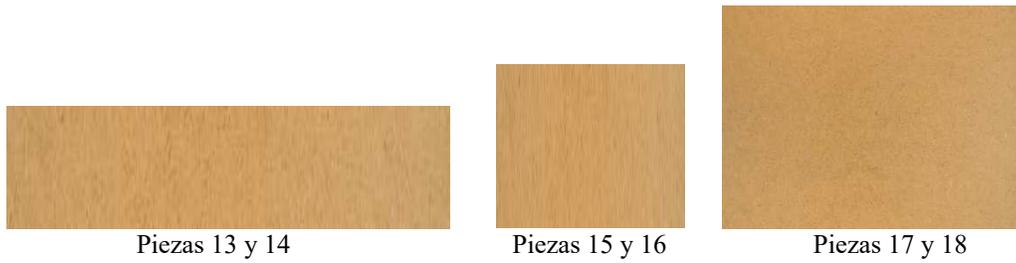
Las 6 piezas de la figura 9 se usan para armar el eje Z. En este eje se implementa el soporte del motor que realiza las perforaciones.

Finalmente, la pieza de la figura 10 es la plataforma donde se va a colocar la placa PCB a perforar, y que es desplazada a lo largo de los ejes X y Y.

La numeración de las piezas de las figuras 8, 9 y 10 corresponden a la numeración de las piezas de la figura 12, para identificar la ubicación de cada una de ellas en la máquina diseñada.



**Figura 8. Piezas utilizadas para formar la base de la máquina diseñada.**



**Figura 9. Piezas del eje Z.**



Pieza 19

**Figura 10. Base para colocar el PCB a perforar.**

En la tabla 1 se muestran las dimensiones de las piezas de las figuras 1 a 19.

**Tabla 1. Dimensiones de las piezas utilizadas.**

<b>No. De pieza</b>	<b>Dimensiones</b>
<i>Pieza 1</i>	<i>5cm x 60cm</i>
<i>Pieza 2</i>	<i>5cm x 60cm</i>
<i>Pieza 3</i>	<i>5cm x 60cm</i>
<i>Pieza 4</i>	<i>13cm x 60cm</i>
<i>Pieza 5</i>	<i>5cm x 40cm</i>
<i>Pieza 6 y 7</i>	<i>5cm x 5cm</i>
<i>Pieza 8 y 9</i>	<i>Rectángulo de 65cm x 5cm, con corte rectangular de 40cm x 30 cm</i>
<i>Pieza 10 y 11</i>	<i>10cm x 40cm</i>
<i>Pieza 12</i>	<i>60cm x 65cm</i>
<i>Pieza 13 y 14</i>	<i>30cm x 10cm</i>
<i>Pieza 15 y 16</i>	<i>10cm x 15cm</i>
<i>Pieza 17 y 18</i>	<i>14cm x 14cm</i>
<i>Pieza 19</i>	<i>33cm x 33cm</i>



### 3.4 Ensamble

De acuerdo con el diseño en CAD/CAM, y utilizando las piezas fabricadas y todo el elemento mecánico adquirido, se realiza la integración de todos los componentes, dando como resultado la estructura que se muestra en la figura 11.

En la figura 12 se muestra la relación de las piezas mostradas en las figuras 8 a 10, al momento de tener ensamblado el equipo completo.

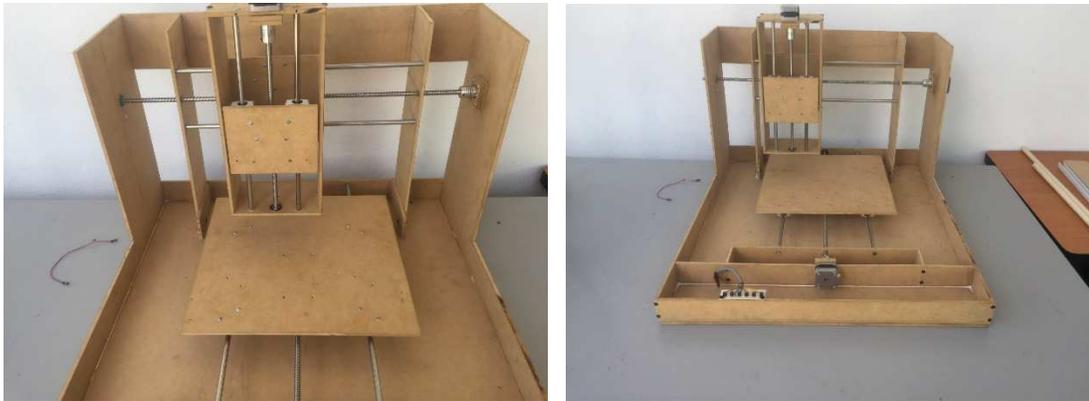


Figura 11. Prototipo inicial ensamblado.

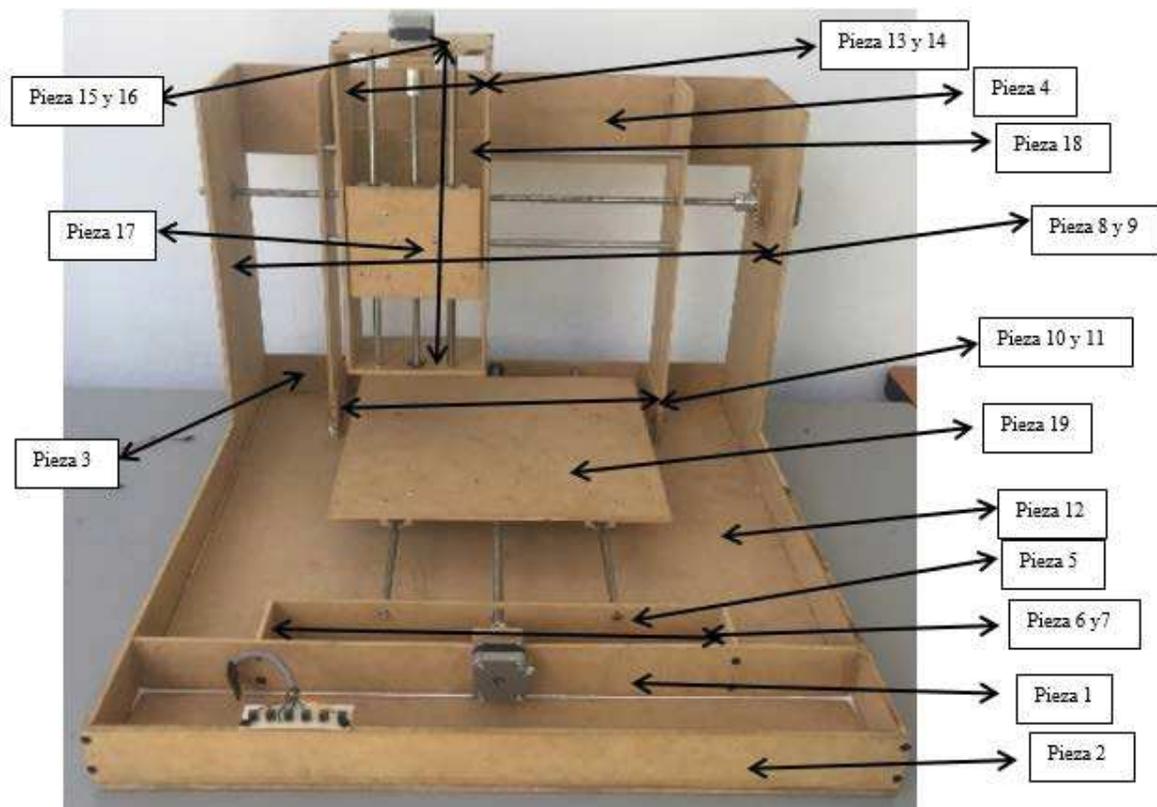


Figura 12. Sistema mecánico ensamblado con numeración de piezas

### 3.5 Electrónica

Para este proyecto se utilizan 3 motores bipolares NEMA 17, ya que de acuerdo a la comparación anterior tenemos que los motores a pasos bipolares son los que constan de mayor torque y anclaje además de que son más pequeños en dimensiones y eso nos ayudaría a optimizar las dimensiones finales.

#### 3.5.1 Etapa de potencia.

En esta etapa se utiliza el microcontrolador NoMADA® Go como herramienta de control y el driver L298N como etapa de potencia y controlador de los motores a pasos, el cual presenta características como:

#### Características del Módulo L298N Driver Puente H L298:

- Circuito Integrado principal: L298N
- Corriente pico de operación: 4 Amperios
- Corriente constante de operación: 2 Amperios
- Bajo voltaje de saturación en los transistores de salida
- Corte de operación por sobrecalentamiento
- Voltaje de alimentación de motores de hasta 46 volts
- Excelente inmunidad al ruido
- Ideal para controlar motores en aplicaciones de robótica

#### 3.5.2 Microcontrolador

Se utiliza un microcontrolador NoMADA® Go es una herramienta que permite crear aplicaciones mecatrónicas utilizando el microcontrolador AVR® ATmega32U4 de la marca Atmel® a través de una tarjeta compacta, la cual puede ser programada desde la interfaz USB mediante el uso de la aplicación FLIP desarrollada por Atmel®. A continuación, se muestra en la figura 13 la tarjeta usada y alguna información adicional. (NoMADA-E corporation, 2015)\*\*\*\*\*

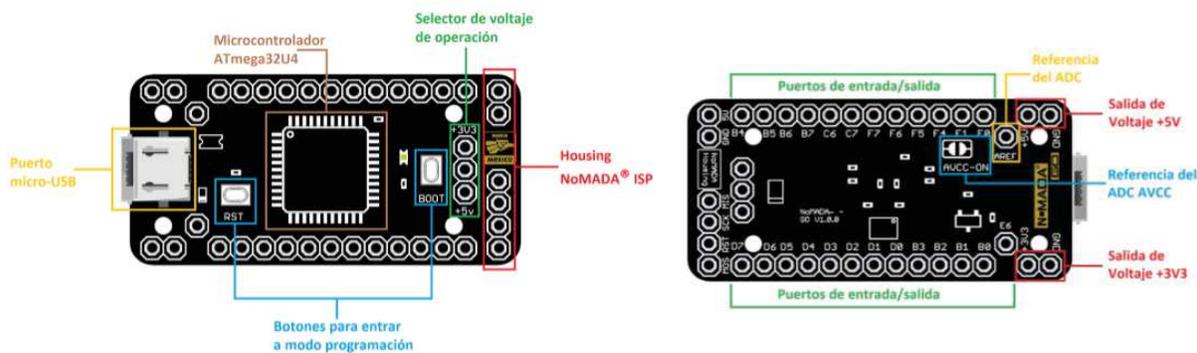


Figura 13. Identificación de partes de la tarjeta NoMADA Go.

### 3.6 Diseño de PCB

En esta etapa se realiza el diseño de una PCB donde se utilizan los componentes que anteriormente mencionamos en la parte de la electrónica. El diseño que realicemos nos tendrá que

servir para controlar los 3 motores, los cuales vamos a utilizar. El diseño de la tarjeta PCB se muestra en la figura 14. En la figura 15 se muestra una vista en 3D del PCB diseñado.

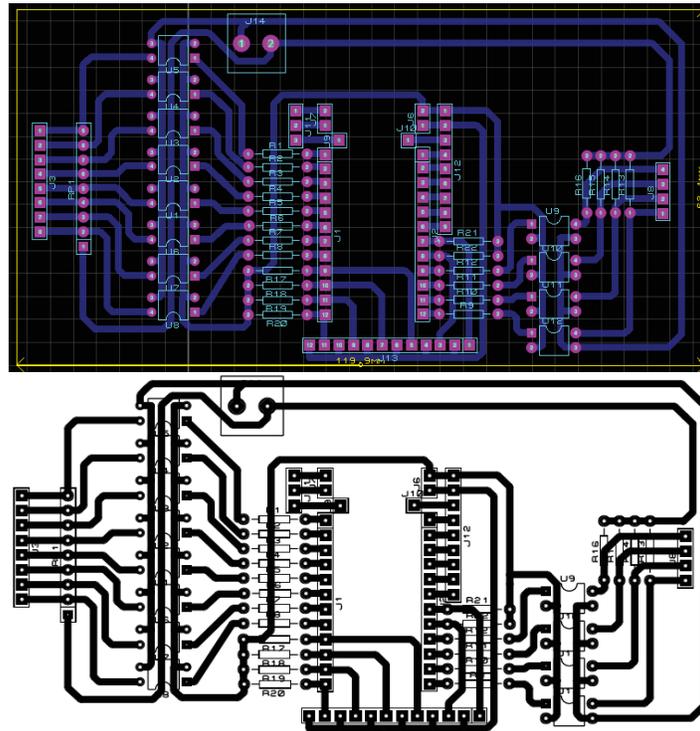


Figura 14. Diseño del controlador de los motores a pasos.

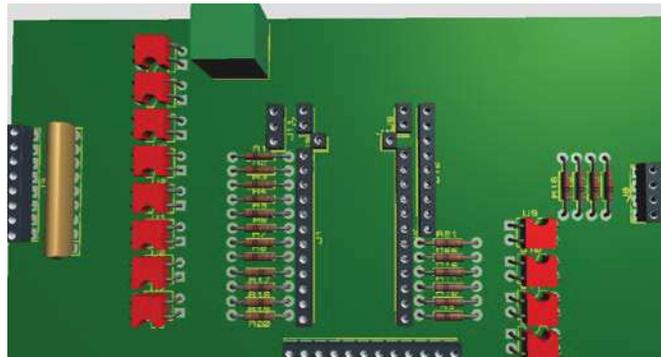


Figura 15. Vista 3D de la tarjeta PCB diseñada.

En la figura 16 se muestra el circuito impreso terminado, con una base para conectar la tarjeta con el microcontrolador.

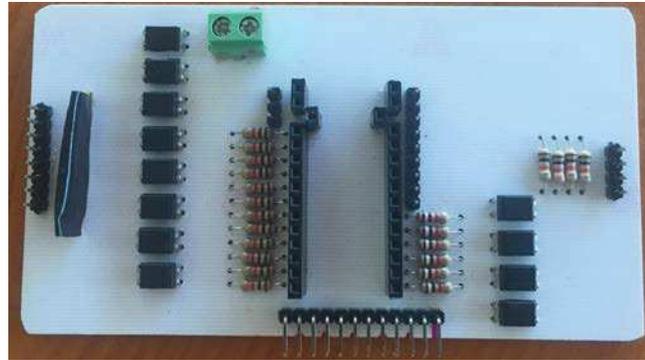


Figura 16. Vista general de la tablilla.

### 3.7 Integración

En esta etapa, se termina de integrar el sistema mecánico con la interfaz de hardware, como se muestra en la figura 17.

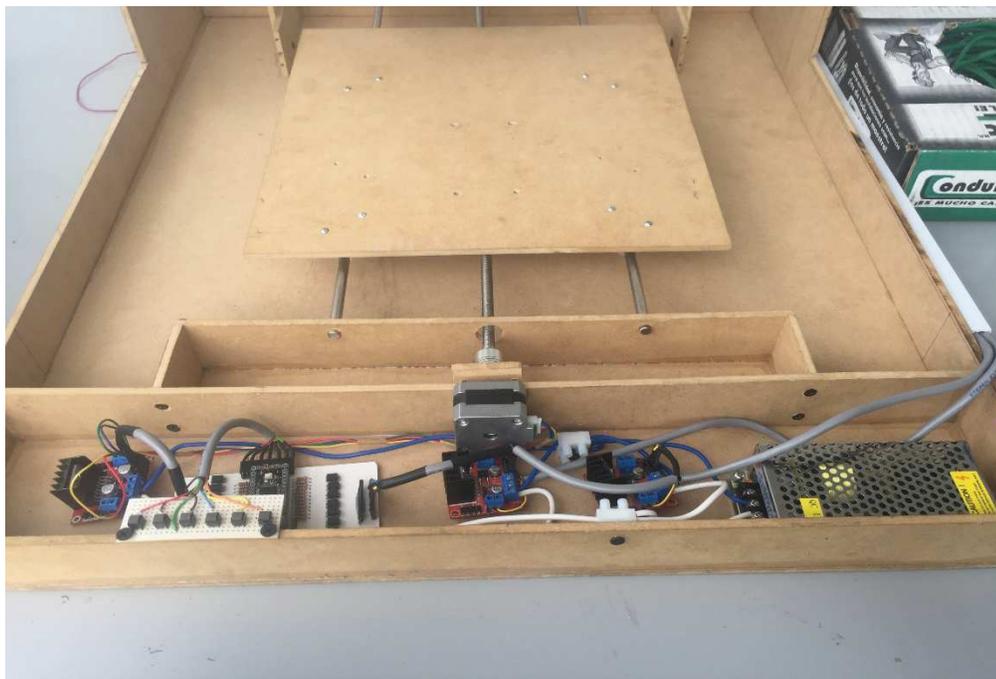


Figura 17. Sistema integrado de manera completa.

## 4. Resultados

Después de implementar la programación y al sistema mecánico, eléctrico y realizar las pruebas, se obtuvieron resultados como lo esperábamos, su desplazamiento es lento, debido a los motores a pasos, así como al tornillo sin fin. Sin embargo, la perforación se logra realizar de manera más precisa y en nuestro caso, las brocas no sufrieron más daño que el ocasionado por su uso.



Este equipo diseñado tuvo un costo total aproximado de \$3,000.00 MN, por lo que, comparado con los costos de un equipo comercial, su costo es mínimo. Por otro lado, se tiene la perspectiva de explotar en mayor medida este trabajo, con fines de investigación y desarrollo tecnológico.

Este prototipo principal es ideal para revisar la funcionalidad del sistema mecánico, con estas pruebas se obtuvo que el sistema mecánico es óptimo y funcional, el cual no presenta fricciones, sin embargo, el diseño del prototipo después de las pruebas resultó que se podrían reducir y hacer aún más eficiente.

## 5. Conclusiones

Se diseñó un sistema embebido que se pone al alcance de los estudiantes para que sirva como herramienta que impulse el desarrollo de las PCBs. El prototipo principal es ideal para revisar la funcionalidad del sistema mecánico, teniendo esas pruebas resultó ser óptimo y eficiente.

El prototipo desarrollado aún queda abierto para mejoras y expansiones en cuanto a programación y sistema electrónico, sin embargo, el sistema mecánico puede ser reducido y mejorar, su capacidad de aplicación que posee es demasiado amplio, el cual se tiene planeado que sea un sistema que contenga un control tipo CNC, que funcione mediante instrucciones de coordenadas utilizando código G para la ubicación de puntos.

## Referencias

- [w1] AliExpress, <https://es.aliexpress.com/item/USB-CNC-router-6040-CNC-Router-1500w-spindle-cnc-drilling-milling-machine-for-metal-wood-pcb/1000001707663.html?spm=a219c.search0304.4.171.06sIVL>.
- [w2] AliExpress, <https://es.aliexpress.com/item/Freeshipping-220V-230W-CNC-3040Z-DQ-upgrade-from-CNC-3040-3040T-Router-Engraver-with-Ball-Screw/767642556.html?spm=a219c.search0304.4.84.06sIVL>.
- [w3] AliExpress, [https://es.aliexpress.com/item/ELE-4040-desktop-cnc-pcb-engraving-machine/32809793840.html?spm=a219c.10010108.1000013.4.KL4mPa&traffic\\_analysisId=recommend\\_2088\\_2\\_82199\\_new&scm=1007.13339.82199.0&pvid=2f425160-dae-4475-9138-23812360404e&tpp=1](https://es.aliexpress.com/item/ELE-4040-desktop-cnc-pcb-engraving-machine/32809793840.html?spm=a219c.10010108.1000013.4.KL4mPa&traffic_analysisId=recommend_2088_2_82199_new&scm=1007.13339.82199.0&pvid=2f425160-dae-4475-9138-23812360404e&tpp=1).
- [w4] AliExpress, <https://es.aliexpress.com/item/Free-tax-to-EU-3020-cnc-machine-500w-4-axis-Engraving-Drilling-machine-for-PCB-Advertising/32800549197.html?spm=a219c.search0304.4.70.06sIVL>.
- [w5] "Elementos básicos en electrónica de potencia", [http://www.ugr.es/~amroldan/enlaces/dispo\\_potencia/biblio.htm](http://www.ugr.es/~amroldan/enlaces/dispo_potencia/biblio.htm).
- [w6] Atmel Corporation, <http://www.atmel.com/tools/atmelstudio.aspx>, consultado el día
- [w7] Nomada Electronics, <http://www.nomada-e.com>. Consultado el día
- [w8] Technirama, [http://historiaybiografias.com/motor\\_electrico/](http://historiaybiografias.com/motor_electrico/), consultado el día
- [1] Patel S. & Patel R. "Automatic Milling Machine", International Journal of Engineering Science and computing (IJESC), 9992-9997.
- [2] Silva W.J, "Ingeniería y procesos de manufactura I", Universitaria, Lima, primera, 2012.
- [3] Gallardo O, "Fabricación de placas de circuito impreso con Proteus", Valladolid, 2015.





# Implementación de un sistema de dehazing basado en el canal oscuro en Raspberry pi 3

Salazar-Colores Sebastián<sup>1</sup>, Ramos Arreguin Juan Manuel<sup>2</sup>, Garduño-Aparicio Mariano<sup>2</sup>, Torres-Hernández Carlos-Miguel<sup>2</sup>, Marco Antonio Aceves Fernández<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro  
jramos@mecamex.net

## Resumen

*En este artículo se muestran los resultados obtenidos al desarrollar un sistema para eliminar los efectos adversos como alteración de color y bajo contraste generados al adquirir imágenes de color en exteriores bajo malas condiciones climáticas, por ejemplo: neblina, niebla y smog, mediante la utilización de sistemas embebidos de bajo costo y bajo consumo energético. Un sistema como el desarrollado tiene potenciales aplicaciones integrándose como parte de otros sistemas que utilicen imágenes en exteriores como conducción autónoma, vigilancia, teledetección. El sistema está montado sobre un sistema embebido, el cuál es en este caso es una Raspberry Pi 3 junto con una cámara de 8 Mega-píxeles, el sistema operativo utilizado es Raspbian, y está programado en C++ junto con librerías OpenCV. La imagen procesada es guardada con lo cual se hace posible la utilización del sistema como parte de un sistema más grande. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad del enfoque propuesto.*

**Palabras clave:** Sistemas embebidos, Raspberry pi 3, dehazing, canal oscuro, openCV.

## 1. Introducción

La Visión Artificial es una rama de la Computación, que tiene como meta la construcción de descripciones explícitas y útiles sobre objetos y escenas físicas reales, con el fin de tomar decisiones basándose en las imágenes detectadas [1]; sin embargo, la mayoría de sistemas de Visión Artificial asumen que el observador está inmerso en un medio totalmente transparente, lo cual en exteriores, generalmente no ocurre, ya que los sensores que capturan las imágenes tienen que lidiar con un amplia gama de condiciones atmosféricas como la neblina, la niebla, el smog, la lluvia, la brisa y la nieve. Estas condiciones generan el fenómeno físico conocido como *hazing*.

La mayoría de aplicaciones de Visión artificial como vigilancia y navegación autónoma requieren de una detección robusta de las características de una imagen, pero las malas condiciones atmosféricas oscurecen las escenas, reducen la visibilidad, y alteran o degradan el contraste y colores, es entonces cuando surge la necesidad de incluir en el sistema de visión mecanismos que contrarresten estos efectos. Desafortunadamente, esto no puede ser realizado satisfactoriamente con técnicas simples de procesamiento de imágenes. Por lo tanto, es necesario entender el fenómeno físico que causa esos resultados y utilizarlo para anular en la medida de lo posible los efectos producidos en las imágenes. El rendimiento de muchos sistemas mecatrónicos dependen de imágenes en exteriores, tales como vigilancia [2], seguimiento de objetivos [3], teledetección [4], control de navegación [5], conducción autónoma [6] y otros. Lo anteriormente mencionado ha impulsado una gran cantidad de investigaciones tratando este problema.

En la literatura, han sido propuestos distintos tipos de estrategias para tratar el problema del *hazing*. Por ejemplo, la utilización de técnicas genéricas de procesamiento de imágenes para el mejoramiento del contraste, como la corrección *Gamma*, ecualización de histogramas, *Unsharp Masking* que si bien logran resultados aceptables en algunos casos, generalmente tienen un pobre



desempeño [7], debido a que tratan a todos los elementos de la imagen por igual y no utilizan información del proceso de degradación que originó el *hazing*, motivado por este hecho recientemente se han presentado algoritmos basados en el modelo de dispersión atmosférica [8].

Los algoritmos basados en el modelo de dispersión atmosférica son divididos en dos grupos: los que requieren información adicional de la imagen de la escena y los que solo trabajan con una. En seguida se muestra un breve panorama general de investigaciones realizadas en estos dos grupos:

Utilizando información adicional de la escena en malas condiciones climatológicas:

- Trabajos como el presentado en [9], donde se utiliza información del infrarrojo cercano, mediante la modificación de cámaras digitales comunes para eliminar el *hazing*.
- Utilizando información de profundidad de los elementos de la escena mediante modelos estructurales 3D de la escena proporcionada por algunas bases de datos, tales como Bing Maps y Google Earth [10]. Las estructuras 3D son entonces alineadas a la imagen degradada y proporcionan la profundidad.
- Métodos basados en la polarización de la luz, que remueven el *hazing* utilizando dos o más imágenes tomadas con diferentes grados de polarización [11], [12], los que calculan la profundidad de la escena utilizando múltiples imágenes de la misma escena que son capturadas en distintas condiciones climatológicas.

Aunque estos métodos producen excelentes resultados, son imprácticos, porque sus requerimientos no pueden ser satisfechos siempre. Por ejemplo, en los algoritmos que utilizan información del infrarrojo cercano se requiere la modificación de dispositivos para poder obtener información del espectro infrarrojo, los que utilizan información 3D están limitados ya que la información no siempre está disponible y en los algoritmos de polarización se presentan problemas en ambientes con viento, vibración o movimiento [13].

En el caso del segundo grupo, donde se emplea una sola imagen y se calcula una aproximación de profundidad de la escena adquirida, se ha encontrado que es este tipo de condición la que ha sido más estudiada recientemente, dado que es la situación más recurrente cuando se trata el problema del *hazing* [14], [15].

K. He en [16], propone el principio del canal oscuro para estimar la transmisión y obtiene resultados satisfactorios en el *dehazing*. Pero sus resultados sufren de halos alrededor de bordes. El mismo autor mejoró el algoritmo usando un *soft matting*. Sin embargo, el proceso es lento y no puede ser usado en sistemas de tiempo real. La utilización del principio del canal oscuro como base para realizar el *dehazing* en proyectos más recientes es amplia, donde se intenta disminuir la complejidad del algoritmo.

Dados los excelentes resultados del algoritmo presentado en [16], en este trabajo se implementa una versión sin etapa de refinamiento, la cual a pesar de su simplicidad disminuye en gran medida los efectos presentes en imágenes obtenidas en exteriores.

## 2. Fundamento teórico

### 2.1 El modelo de dispersión atmosférica

El modelo utilizado para describir la formación de una imagen con *haze* [17] se muestra en (1), y corresponde con la Figura 1.

$$I(\chi) = J(\chi)t(\chi) + A(1-t(\chi)) \quad (1)$$

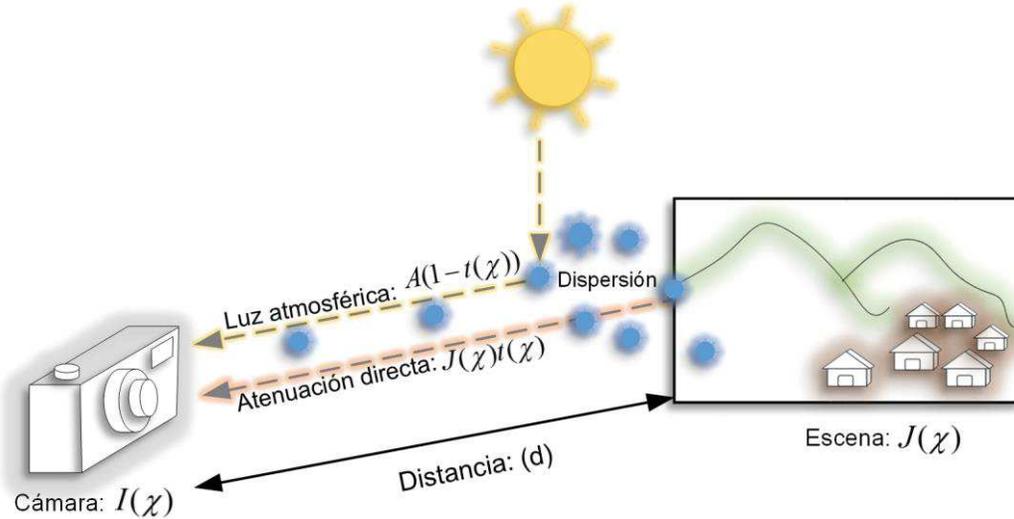


Figura 1. Modelo de dispersión atmosférica.

Donde:

- $I(\chi)$  es la intensidad observada en cada uno de los tres canales  $R$ ,  $G$  o  $B$  del pixel  $\chi = (x, y)$ .
- $J(\chi)$  es el vector de la intensidad  $R, G, B$  de la superficie original de la escena en el mundo real que corresponde al pixel  $\chi = (x, y)$ .
- $A$  es el vector de color de la luz atmosférica global.
- $t(\chi)$  es el medio de transmisión describiendo la porción de luz que no es dispersada o absorbida y alcanza la cámara.
- Cuando la atmósfera es homogénea, la transmisión  $t(\chi)$  puede ser expresada como:

$$t(\chi) = e^{-\beta \cdot d(\chi)} \quad (2)$$

Donde:

- $\beta$  es el coeficiente de dispersión de la atmósfera.
- $d(\chi)$  es la profundidad del elemento.

La dificultad de obtener  $J(\chi)$  radica en que en la imágenes se desconocen las variables  $A$  (luz atmosférica) y  $t(\chi)$  (transmisión), lo que requiere el uso de conjeturas y suposiciones para encontrar una aproximación a estos valores. Uno de los algoritmos más importantes que genera de manera muy certera estos valores es el principio del canal oscuro [16], el cuál es el algoritmo implementado en el sistema embebido.

## 2.2 El canal oscuro

El principio del canal oscuro, *dark prior channel*, propuesto en el 2011 en [16], es una observación de lo que ocurre en imágenes que no presentan el problema del *hazing*, y son adquiridas de ambientes exteriores. En la mayoría de las regiones locales de una imagen (que no representen el cielo), al menos un canal del color ( $R$ ,  $G$  o  $B$ ) (llamado canal oscuro), tiene una muy baja intensidad en algunos pixeles. En otras palabras, la mínima intensidad en tales regiones locales de pixeles tiene un valor muy bajo (cercano a 0).



Formalmente, para una imagen  $I(\chi)$ , el canal oscuro  $I^{dark}(\chi)$  se define como [16]:

$$I^{dark}(\chi) = \min_{C \in R, G, B} (\min_{y \in \Omega(\chi)} (I^c(y))) \quad (3)$$

donde  $\Omega(\chi)$  es la región local centrada en  $\chi$ ,  $I^c$  es el canal de color de  $I$  (R, G o B) e  $y$  denota el índice para un pixel en  $\Omega(\chi)$ , por lo tanto el *principio del canal oscuro* está definido como:

$$I^{dark}(\chi) \rightarrow 0 \quad (4)$$

La observación del canal oscuro se cumple en la mayoría de las ventanas utilizadas. Sin embargo, no en todos se cumple lo anterior. Al decir la "mayoría" se debe entender que hay una alta probabilidad de que la observación sea cierta. Así que esta observación es verdadera sólo en términos estadísticos.

Sustituyendo en el modelo de dispersión atmosférica el principio del canal oscuro, suponiendo que la transmisión en una ventana local es constante y tomando el operador mínimo para los tres canales de color se tiene la ecuación (5).

$$\min_c (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{J_h^c(y)}{A^c})) = t(\chi) \min_c (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{I_h^c(y)}{A^c})) + (1 - t(\chi)) \quad (5)$$

donde,  $t(\chi)$  es la transmisión en la ventana, como  $A$  es siempre positiva y el Canal oscuro de una imagen libre de *hazing* de la imagen  $J$  tiende a cero de acuerdo al *dark prior channel*, se tiene:

$$\min_c (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{I_h^c(y)}{A^c})) = 0 \quad (6)$$

Entonces la transmisión puede ser expresada como (7).

$$t(\chi) = 1 - \min_c (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{I_h^c(y)}{A^c})) \quad (7)$$

Aunque la hipótesis del canal oscuro no fue propuesta teniendo en cuenta a los píxeles que forman el cielo, la ecuación anterior continúa funcionando, debido a que el cielo está a una distancia infinita, lo que hace que el valor de la transmisión sea cercano a 0. Teniendo en cuenta que la ausencia total de *hazing* hace parecer a la imagen poco natural, el autor propone utilizar un valor  $\omega = 0.95$  para dar naturalidad a las imágenes en (8).

$$t(\chi) = 1 - \left( \omega \min_c (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{I_h^c(y)}{A^c})) \right) \quad (8)$$

### 2.3 Estimación de la luz atmosférica

La luz atmosférica  $A$  es definida como el pixel con la intensidad más alta en la imagen original  $I_h$  del 0.1% de los píxeles con mayor intensidad en el canal oscuro. En la figura 2, se muestra un ejemplo del proceso del algoritmo:



Figura 2. Algoritmo para estimar la luz atmosférica.

Una vez explicados los conceptos utilizados, se procede a mostrar el proceso de desarrollo de la investigación.

## 3. Desarrollo

### 3.1 Elección de sistema embebido

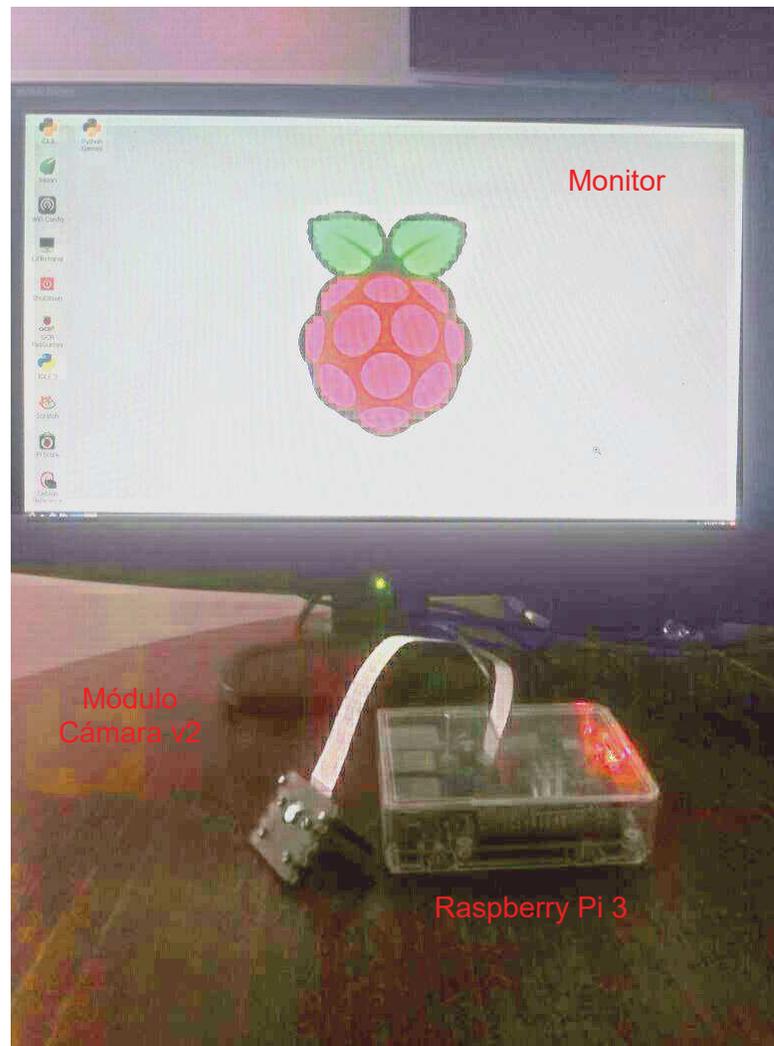
El sistema embebido elegido fue la Raspberry Pi 3 básicamente por cinco factores principalmente [18]:

1. El primero, sus capacidades técnicas ya que tiene un procesador Quad Core 1.2GHz Broadcom BCM2837 64bit CPU con 1 GB de RAM, salida HDMI, puertos USB, tecnología WI-FI y 4 puertos USB.
2. El segundo, su bajo consumo energético, de apenas 4 Watts.
3. El tercero, la comunidad de soporte que hay detrás de este proyecto ya que se han vendido más de 3 millones de unidades de este modelo.
4. La posibilidad de instalar distintos sistemas operativos (Linux, Windows IoT Core).
5. La posibilidad de agregarle una cámara con soporte oficial para obtener imágenes.

Para la parte experimental se usa la cámara módulo V2 de Raspberry, la cual tiene un sensor Sony IMX219 de 8 Megapíxeles. Se usa un monitor Gateway de resolución 1360 x 768 píxeles para visualizar los resultados del experimento.

### 3.2 Elección de software

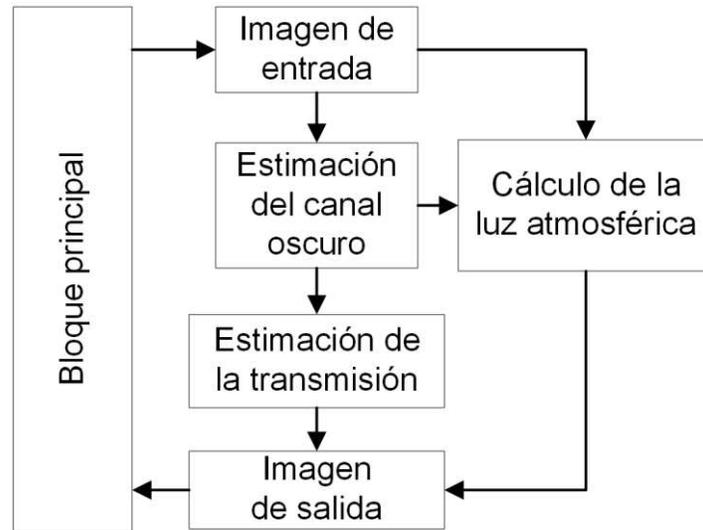
La Raspberry Pi 3 soporta distintas distribuciones de Linux como openSUSE, LibreElec, Ubuntu MATE, Android Lollipop, Raspbian, entre otros [19]. Se elige la versión Raspbian, mediante la utilización del instalador NOOBS, dado el soporte del lenguaje C++, librerías OpenCV y la facilidad de instalación. En la figura 3 se muestra una imagen con la configuración del experimento utilizado.



**Figura 3. Configuración del experimento realizado.**

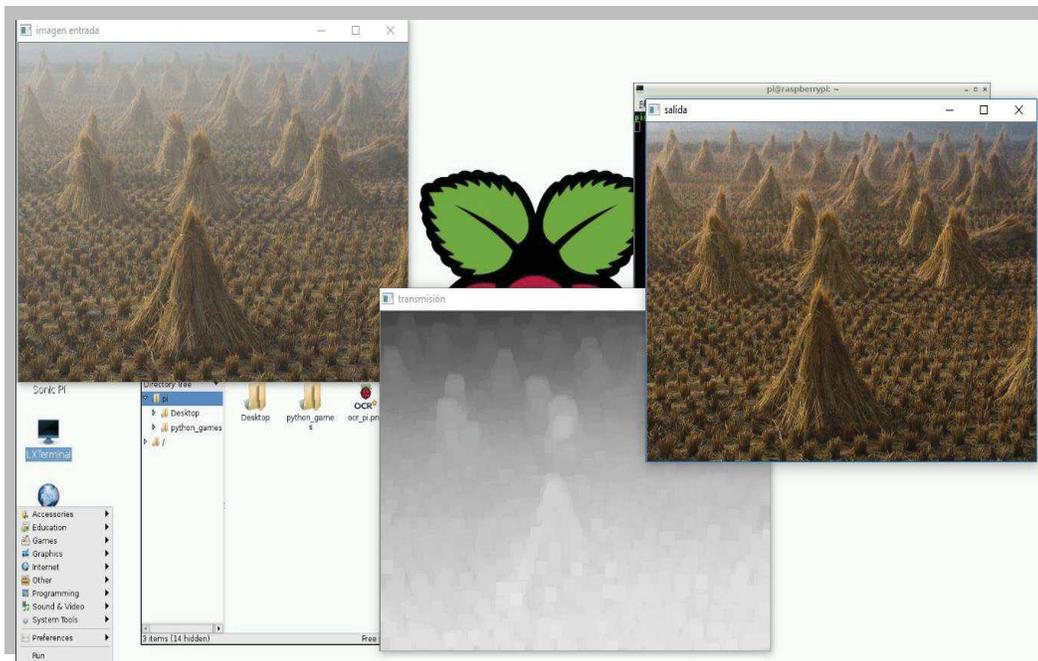
### 3.3 Diseño de la implementación

Se utiliza C++ versión 11, junto con librerías de OpenCV versión 2.4.10, ya que las librerías OpenCV permiten realizar funciones como leer y escribir una imagen, con una gran eficiencia, disminuyendo el tiempo de desarrollo del programa sin perder velocidad. Basado en el principio del canal oscuro descrito en la sección 2.2, su implementación en el entorno mencionado fue llevada a cabo mediante la estructura mostrada en la figura 4. En la Figura 4 se muestra que el bloque principal inicia con la adquisición de la imagen de entrada, seguido por la estimación del canal oscuro (Ecuación (3)). LA luz atmosférica es obtenida de acuerdo al método aplicado en [16]. La estimación de la transmisión es mediante la Ecuación (8). Finalmente, el sistema devuelve una imagen de salida.



**Figura 4. Configuración del experimento realizado.**

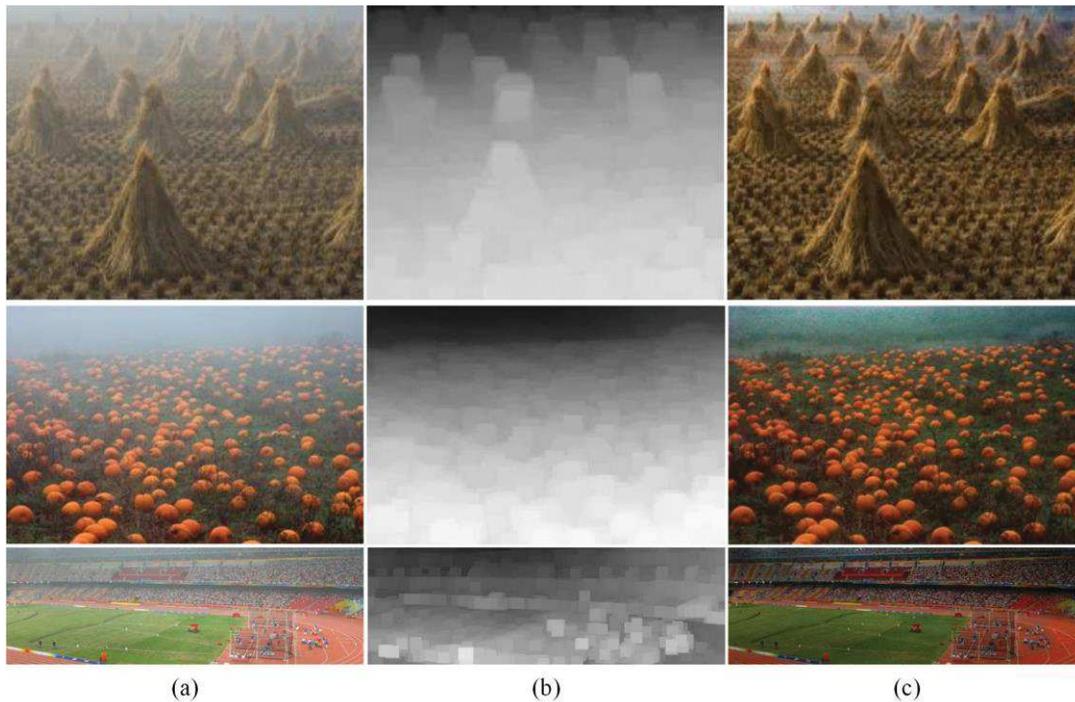
En la figura 5 se muestra un ejemplo de la pantalla con los resultados del programa diseñado ejecutándose. Se puede observar en la parte izquierda de la Figura 5 la imagen original considerada antes de los cálculos, mostrando en la derecha de esa misma figura la imagen después del proceso realizado en la tarjeta Raspberry con el algoritmo propuesto. La ventana titulada “transmisión” de la Figura 4 muestra los valores  $t(\lambda)$  obtenidos por el algoritmo que se detalla en la Figura 4.



**Figura 5. Captura de pantalla con un ejemplo de la ejecución del programa diseñado.**

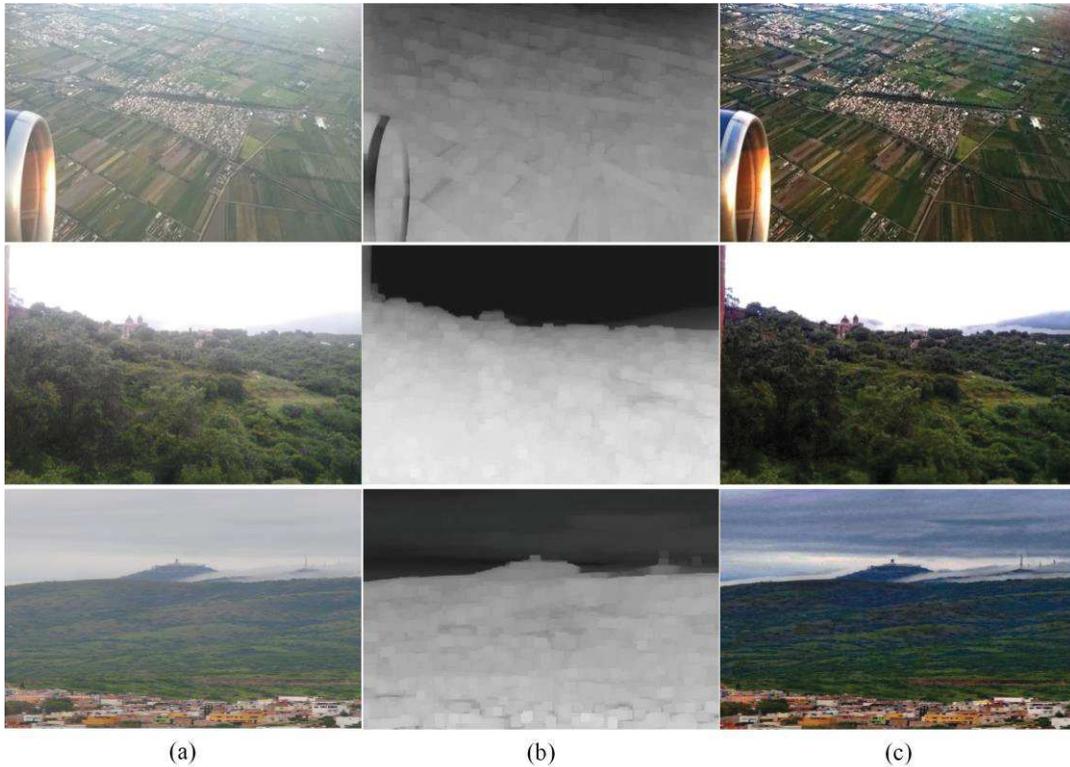
#### 4. Resultados

Para probar el desempeño del algoritmo implementado fueron realizadas dos tipos de pruebas, la primera de ellas, fue aplicar como entrada al sistema imágenes utilizadas comúnmente en la literatura (Figura 6), donde en forma de columnas se observa la imagen de entrada (lado izquierdo), la transmisión estimada (imagen central), y la imagen restaurada (imagen en lado derecho). Los cambios y mejoras en la imagen mostrada como restaurada son notorios y modifican en gran medida la percepción de profundidad y haze.



**Figura 6. Resultados del sistema para imágenes de la literatura.**

La segunda prueba mostrada en la Figura 7 fue realizada utilizando imágenes de ambientes naturales para la cual también se muestra la imagen de entrada, la transmisión estimada, y la imagen restaurada. Para estos resultados se puede observar el cambio de los tonos de colores, cuyos valores y composición obtenidos por el algoritmo propuesto permiten que se pueda distinguir mejor el contraste entre los objetos cercanos y los de mayor distancia para el observador. La transmisión estimada mostrada en la columna central de la Figura 7, donde se reconoce de forma pronosticada las cantidades de luz existentes en la imagen y esto permite una buena separación de los objetos cercanos y lejanos, los resultados finales son satisfactorios.



**Figura 7. Resultados del sistema para imágenes naturales.**

Finalmente se realizó otro análisis, ahora para el tamaño de imagen y el tiempo de ejecución necesitado, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 1.

**Tabla 1. Análisis del tamaño de la imagen y el tiempo de ejecución en segundos.**

Tamaño de la imagen	Raspberry Pi 3	PC
600 x 400	0.45	0.02
1280 x 720	1.53	0.05
1900 x 1080	3.90	0.12
3840 x 2160	9.36	0.23

La variación del tiempo de ejecución se considera proporcional al tamaño de la imagen como habría de esperarse, pero cuyo resultado es muy apropiado para un sistema embebido, como lo es la tarjeta Raspberry Pi 3.

## 5. Conclusiones

El presente trabajo permite demostrar la viabilidad de incorporar en un sistema embebido de bajo costo y consumo energético como lo es el Raspberry Pi 3 un algoritmo de procesamiento de imágenes, que mejora de forma significativa las imágenes tomadas en exteriores. Sin embargo, el tiempo de procesamiento del algoritmo en el sistema embebido aun es de aproximadamente un orden de magnitud más lento que su implementación en una computadora personal, por lo cual se tiene como trabajo futuro la implementación en un sistema embebido con más poder de cómputo, así como la incorporación de programación en paralelo con la finalidad de conseguir procesar video en tiempo real. Con lo cual el algoritmo alcanzaría su máximo potencial ya que la mayoría de las aplicaciones como conducción autónoma y vigilancia aprovecharían mejor sus resultados.



## Referencias

- [1] L. G. Shapiro and G. C. Stockman, *Computer Vision*. Prentice Hall, 2005.
- [2] Y. Cheng, W. Niu, and Z. Zhai, "Video dehazing for surveillance unmanned aerial vehicle," in *AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings*, 2016, vol. 2016–December.
- [3] J. H. Kim, W. D. Jang, J. Y. Sim, and C. S. Kim, "Optimized contrast enhancement for real-time image and video dehazing," *J. Vis. Commun. Image Represent.*, vol. 24, no. 3, pp. 410–425, 2013.
- [4] J. Long, Z. Shi, and W. Tang, "Fast haze removal for a single remote sensing image using dark channel prior," in *International Conference on Computer Vision in Remote Sensing (CVRS)*, 2012, vol. 1, pp. 132–135.
- [5] S. Kim, S. Park, and K. Choi, "A system architecture for real time traffic monitoring in foggy video," in *Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV)*, 2015, vol. 1, pp. 1–4.
- [6] X. Yan, X. Li, Y. Liu, and J. Zhao, "Effects of foggy conditions on drivers' speed control behaviors at different risk levels," *Saf. Sci.*, vol. 68, pp. 275–287, 2014.
- [7] R. Fattal, "Single Image Dehazing," in *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2008, vol. 27, no. 3, p. 72:1--72:9.
- [8] C. Chengtao, Z. Qiuyu, and L. Yanhua, "A survey of image dehazing approaches," in *Control and Decision Conference (CCDC)*, 2015, vol. 1, pp. 3964–3969.
- [9] L. Schaul, C. Fredembach, and S. Susstrunk, "Color image dehazing using the near-infrared," in *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2009, vol. 1, pp. 1629–1632.
- [10] J. Kopf et al., "Deep Photo: Model-based Photograph Enhancement and Viewing," *ACM Trans. Graph.*, vol. 27, no. 5, p. 116:1--116:10, 2008.
- [11] Q. Liu, H. Zhang, M. Lin, and Y. Wu, "Research on image dehazing algorithms based on physical model," in *International Conference on Multimedia Technology (ICMT)*, 2011, vol. 2, pp. 467–470.
- [12] X. Wang, X. Jin, G. Xu, and X. Xu, "A Multi-Scale Decomposition Based Haze Removal Algorithm," in *International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE)*, 2012, vol. 2, pp. 1–4.
- [13] Y. Y. Schechner, S. G. Narasimhan, and S. K. Nayar, "Instant dehazing of images using polarization," in *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2001, vol. 16, p. 1--325.
- [14] C. H. Chen and P.-G. P. Ho, "Statistical pattern recognition in remote sensing," *Pattern Recognit.*, vol. 41, no. 9, pp. 2731–2741, 2008.
- [15] T. Yu, I. Riaz, J. Piao, and H. Shin, "Real-time single image dehazing using block-to-pixel interpolation and adaptive dark channel prior," *Image Process. IET*, vol. 9, no. 9, pp. 725–734, 2015.
- [16] K. He, J. Sun, and X. Tang, "Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 33, no. 12, pp. 2341–2353, 2010.
- [17] H. Zhang, Q. Liu, F. YANG, and Y. WU, "Single Image Dehazing Combining Physics Model based and Non-physics Model based Methods," *J. Comput. Inf. Syst.*, vol. 9, no. 4, pp. 1623–1631, 2013.
- [18] "No Title," <https://www.raspberrypi.org/>. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/>.
- [19] "No Title," [rasberryparatorpes.net](https://rasberryparatorpes.net/), 2017. [Online]. Available: <https://rasberryparatorpes.net/raspberry-pi-sistemas-operativos/>.



# Modelado matemático de un cohete hidropulsado

Fuente Castillo Misael, Mancilla Alonso Humberto

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Estudios Superiores "Aragón"

## Resumen

En la búsqueda de una ecuación que describiera el comportamiento de un cohete hidropulsado, la información sobre estos tipos de ingenios es muy limitada y la que hay se enfoca en cohetes de propulsión por salida de gases calientes producidos por una combustión, por lo que, se desarrolló una ecuación en la cual aparecen términos de presiones, capacitancias y resistencias hidráulicas. Esta ecuación nos dice la posición del cohete en un tiempo que se determine. Pero se hicieron las suposiciones de que los cambios de masa y una presión hidrostática eran cercanas a cero por lo que sería prudente quitar esas consideraciones.

También la gráfica de esta ecuación tiene un corrimiento por lo que las presiones se debieron de considerar barométricas

**Palabras clave.** Cohete hidropulsado, dinámica de sistemas, ecuación de movimiento

## 1. Introducción

Actualmente la información de cohetes hidropulsados, en cuestión del modelado matemático que determina la altura que alcanzaría un cohete de este tipo (agua y aire a presión), es escasa y no se proporciona más que una fórmula sin dar un análisis más detallado, así como el desarrollo matemático basado en los modelados hechos para cohetes de propulsión por salida de gases calientes.

Como dicha información se encuentra enfocada hacia los cohetes que expulsan gases calientes, en el modelado, las variables que se aplicarían a estos como podría ser entalpías, energía interna, no aplican a un cohete hidropulsado en donde son despreciables sus valores. Pero algunos otros como el volumen de agua y presiones que ayuda a alcanzar la altura requerida no aparecen.

Lo que deja varias incógnitas para aquellos que buscan desarrollar un cohete donde es fundamental saber la altura que se podría alcanzar

## 2. Modelado matemático

De la asignatura de modelado matemático de sistemas se dedujo que un cohete hidropulsado son dos sistemas que interactúan, un sistema mecánico y uno hidráulico, por lo que se analizaron por separado. Empezando por el mecánico

Se realiza un diagrama de cuerpo libre de un cohete hidropulsado como se muestra en la figura 1.

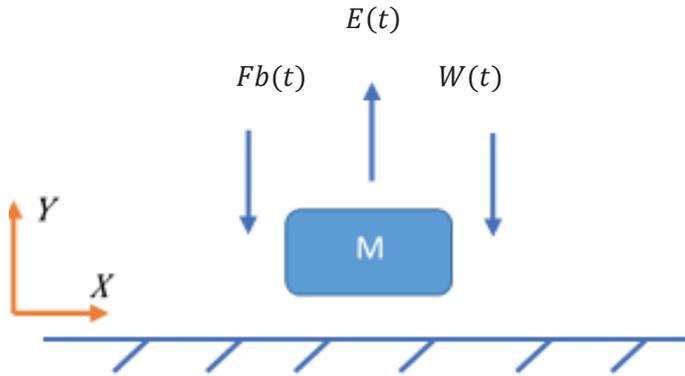


Figura 1 Diagrama de cuerpo libre de la parte mecánica

Donde:

$E(t)$ : Empuje necesario para elevar la masa

$M$ : Masa

$F_b$ : Fricción generada por el aire

$W(t)$ : Peso

De acuerdo a la ecuación de equilibrio de un sistema mecánico se sabe que

$$\sum F_i = 0 \tag{1}$$

Por consiguiente, con base en el diagrama de cuerpo libre del sistema que se presentó y considerando nuestros ejes de referencia. Se obtiene la ecuación 1.

$$E(t) - w(t) - F_b = 0 \tag{2}$$

Después se analiza el sistema hidráulico, para lo cual se dibuja el diagrama de la figura 2.

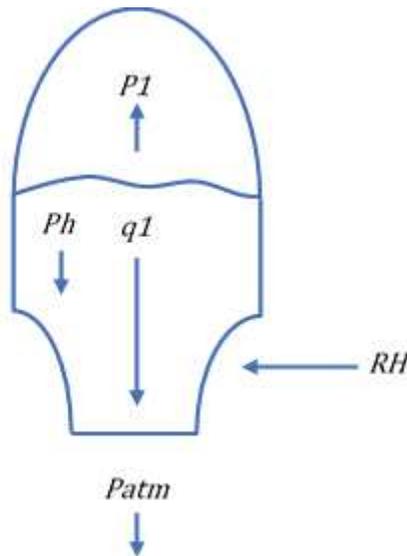


Figura 2 Diagrama de las fuerzas que actúan en el sistema hidráulico

Donde:

$P_1$ : Presión suministrada



Ph: Presión debida a la columna de agua

q1: Flujo del agua

RH: Resistencia hidráulica

Patm: Presión atmosférica

Se nota que cuando el sistema esta en reposo su ecuación de equilibrio es:

$$P1 - Patm - Ph = 0 \quad (3)$$

Donde:

P1: Es la presión al interior de la botella

P atm: Presión atmosférica

Ph : Presión ejercida por la columna de agua

Después de obtener la presión que aporta la columna de agua por medio del principio de presión hidrostática

$$P = \rho g h \quad (4)$$

Donde

P: Presión

$\rho$ : Densidad

h: Altura de la columna de agua

g: Aceleración del campo gravitacional

Se estableció que la presión ejercida por dicha columna era de 3237.3 [Pa] pascales, que, al momento de comparar con una presión que ejercería el aire comprimido a la botella era de 689476 [Pa] pascales, por lo que se consideró que la presión hidrostática es despreciable. Por lo tanto, reescribiendo la ecuación 3

$$P1 - Patm = 0 \quad (5)$$

De manera que el cambio de presiones pudo ser relacionado con una capacitancia hidráulica y un flujo volumétrico por medio de la ecuación diferencial de la capacitancia hidráulica:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{C_h} q \quad (6)$$

Donde

Ch: Capacitancia hidráulica

q: Gasto o flujo volumétrico

P: Presión

Pero para obtener un flujo volumétrico total se consideran el flujo de entrada y el flujo de salida, por lo que la ecuación 6 se reescribe como sigue.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{C_h} [\sum qe - \sum qs] \quad (7)$$

En el momento en el que se analiza el cohete se estima que el tanque que contiene el agua y el aire comprimido ya se ha cargado y está listo para ser lanzado, por lo que, en ese instante, no existe un flujo volumétrico de entrada por lo tanto la ecuación 7 queda como



$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{C_h} [- \sum qS] \quad (8)$$

Para poder relacionar el gasto que sale del tanque contenedor, con las variables de presión. Se ocupara la ecuación diferencial que relaciona el gasto con la diferencia de presiones, y así, aparece la variable de la resistencia hidráulica.

$$qS = \frac{1}{R_h} (P_1 - P_{atm}) \quad (9)$$

Sustituyendo la ecuación 9 en la ecuación 8

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{1}{C_h} \left[ - \frac{1}{R_h} (P_1 - P_{atm}) \right] \quad (10)$$

Y, simplificando el signo

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{1}{C_h} \left[ \frac{1}{R_h} (P_{atm} - P_1) \right] \quad (11)$$

Para después eliminar paréntesis

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{P_{atm} - P_1}{C_h R_h} \quad (12)$$

Esta ecuación diferencial se resolvió. Para poder obtener una función que expresé la forma en cómo se comportaba la presión en función del tiempo por lo que se determina que se resolverá por la transformada de Laplace, ya que es un método que no necesita de valores iniciales para determinar coeficientes. Por lo que se obtuvo la ecuación 13

$$P_1(t) = (p(0) - P_{atm}) e^{-\frac{t}{R_h C_h}} + P_{atm} \quad (13)$$

Esta presión arrojará la forma de relacionar el sistema hidráulico con el mecánico. Ya que la presión P1, era la presión que había al interior del tanque, sería la que dará el empuje en el agua y por lo tanto la fuerza necesaria para elevar el cohete.

Por lo que, para obtener la fuerza que dicha presión proporciona. Se usará el principio de Pascal

$$P = \frac{F}{A} \quad (14)$$

Donde:

P: Presión

F: Fuerza

A: Área

Considerando lo anterior y despejado la fuerza se obtuvo la ecuación 15

$$P_1 A = F \quad (15)$$

Por lo que la fuerza de empuje E(t) quedaría como la siguiente ecuación, así, reescribiendo la ecuación 15:

$$E(t) = P_1(t) A \quad (16)$$

Y, sustituyendo P1 en la ecuación 16 se obtiene la ecuación 17

$$E(t) = \left( (p(0) - P_{atm}) e^{-\frac{t}{R_h C_h}} + P_{atm} \right) A \quad (17)$$



Al momento de encontrar el peso del cohete se observó que cambiaba la masa y la velocidad, para lo cual, ocupando la segunda ley de Newton

$$w(t) = m.g \quad (18)$$

Donde cambiaba la masa

$$w(t) = (\dot{m}t + m)g \quad (19)$$

Y utilizando momentos lineales

$$w(t) = \bar{v} \frac{\partial m}{\partial t} + m \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \quad (20)$$

Para reducir el análisis, Se desprecia el cambio de masa, ya que se observó que el agua salía del cohete en un tiempo muy corto. Por lo que la primera expresión de la ecuación 20 iba a ser tan chica que se aproximaría al cero. Por lo reescribiendo la ecuación 20. Obteniendo.

$$w(t) = m \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \quad (21)$$

Después de haber obtenido todas las relaciones entre las variables hidráulicas y mecánicas obtuvo la ecuación 22.

$$\left[ ((p(0) - P_{atm}) e^{-\frac{t}{R_H C_H}} + P_{atm}) A \right] - m \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = 0 \quad (22)$$

Para encontrar la posición del cohete, Despejando la última expresión de la ecuación 22.

$$\left[ ((p(0) - P_{atm}) e^{-\frac{t}{R_H C_H}} + P_{atm}) A \right] = m \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \quad (23)$$

Y normalizandola ecuación anterior (23). Quedando.

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = \frac{\left[ ((p(0) - P_{atm}) e^{-\frac{t}{R_H C_H}} + P_{atm}) A \right]}{m} \quad (24)$$

Por lo que se observa que la ecuación 24 se podría resolver por integración.

$$\int_0^t \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} dt = \int_0^t \frac{\left[ ((p(0) - P_{atm}) e^{-\frac{t}{R_H C_H}} + P_{atm}) A \right]}{m} dt \quad (25)$$

Y resolviendo:

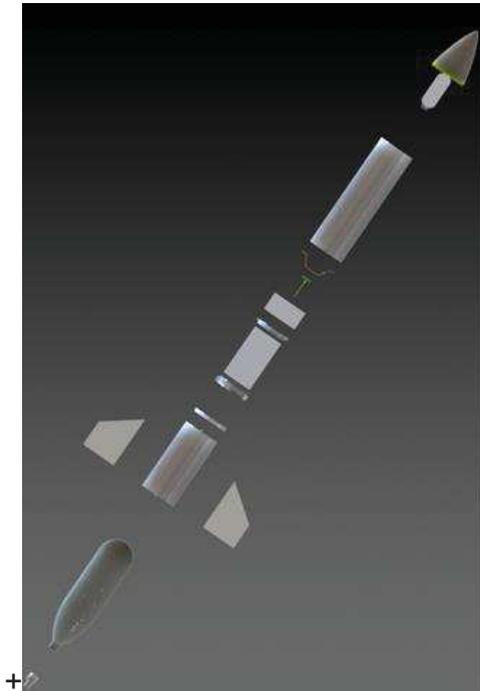
$$y(t) = \frac{\left[ ((p(0) - P_{atm}) e^{-\frac{t}{R_H C_H}} + P_{atm}) A \right]}{m} t^2 \quad (26)$$

Después de haber obtenido la ecuación 26 se obtendrá la constante de tiempo del sistema, para saber el momento en el cual se va a descargar la botella para lo cual se ocupó la ecuación 13.

$$P_1(t) = (p(0) - P_{atm}) e^{-\frac{t}{R_H C_H}} + P_{atm} \quad (27)$$

### 3. Resultados

Para obtener la constante de tiempo se estimaron los valores. Con base en un modelo virtual realizado en un programa de CAD mostrado en la figura 3 y una competencia realizada por la Agencia Espacial Mexicana. Cuyo nombre es “misiones espaciales 2017”, en el cual solicitaron utilizar una presión de 60 psi.



**Figura 3 Modelo virtual del cohete hidropropulsado**

Con la ayuda de las condiciones proporcionadas se obtiene la frecuencia y constante de tiempo.

Primero se despeja la ecuación 13 para obtener el término que involucra al tiempo, la capacitancia y la resistencia hidráulica. Para lo que despejando la presión atmosférica obteniendo la ecuación 28

$$P_1(t) - P_{atm} = (p(0) - P_{atm})e^{-\frac{t}{R_H C_H}}, \quad (28)$$

De lo que se obtendría la ecuación 29

$$\frac{P_1(t) - P_{atm}}{p(0) - P_{atm}} = e^{-\frac{t}{R_H C_H}} \quad (29)$$

Despejando  $-\frac{t}{R_H C_H}$  y sustituyendo los valores iniciales. Se obtendría la frecuencia natural del sistema

$$0.5413 = \frac{1}{R_H C_H} = f \quad (30)$$

Conociendo de la materia de modelado de sistemas físicos que, la constante de tiempo es el inverso de la frecuencia natural del sistema.

$$\tau = \frac{1}{.5413} = 1.852 \quad (31)$$

Y sabiendo que cinco veces la constante de tiempo ( $\tau$ ) se estabiliza un 89% de un sistema. Entonces



$$5\tau = 9.26 \tag{32}$$

Por lo que el sistema se estabilizaba en 9 segundos aproximadamente.

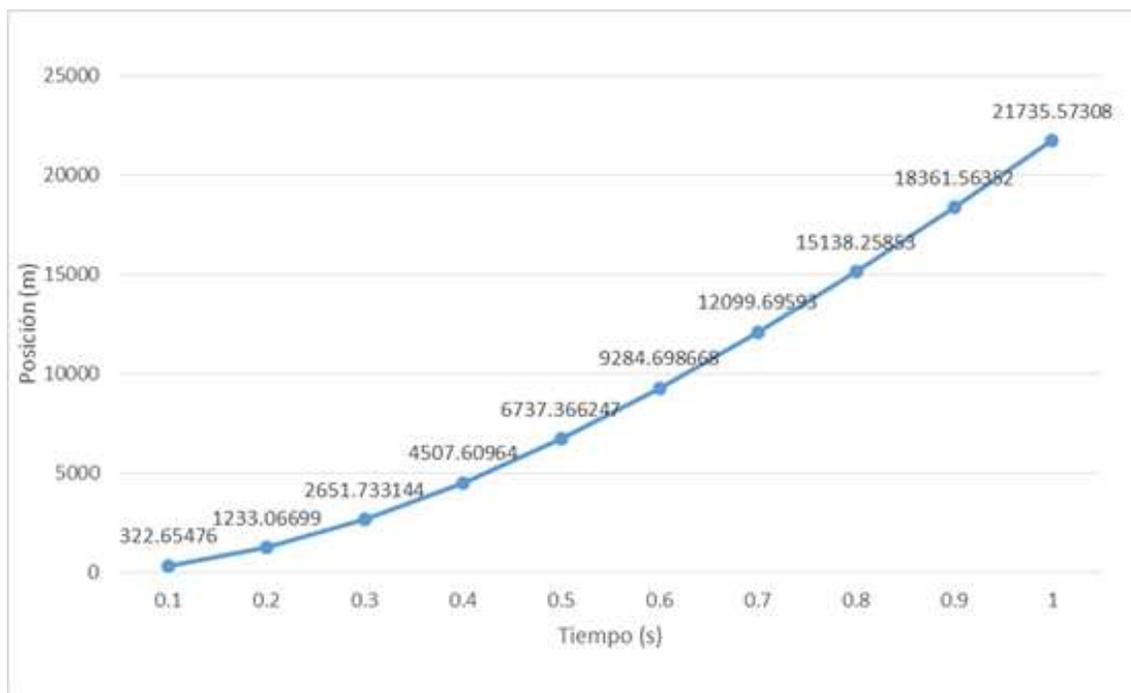
Con lo cual se estimó que en 15 segundos la presión del cohete se habría igualado a la atmosférica.

Estos valores se sustituyeron en la ecuación 26 arrojando los datos de la tabla 1

**Tabla 1**

t	Y(t)
0.1	322.65476
0.2	1233.06699
0.3	2651.73314
0.4	4507.60964
0.5	6737.36625
0.6	9284.69867
0.7	12099.6959
0.8	15138.2585
0.9	18361.5635
1	21735.5731

Con los cuales se obtendra la gráfica mostrada en la figura 4



**Figura 4. Gráfica posición vs tiempo**

## 4. Conclusiones

Habiendo buscado una tabla de capacitancias y resistencias hidráulicas conocidas no se lograron encontrar valores para un tanque. Simplemente las ecuaciones de modelado de



sistemas, por lo que para realizar una aproximación más fiable se necesitó caracterizar el tanque que se uso

Por la gráfica mostrada en la figura 4 se observa que existe un corrimiento provocado por las capacitancias y resistencias hidráulicas que se descargan y empiezan a tender a ser cero

$$e^{-\frac{t}{R_H C_H}} \approx 0 \quad (33)$$

Por lo que en ese instante la ecuación 26 quedaría

$$y(t) = \left[ \frac{(P_{atm})A}{m} \right] t^2 \quad (34)$$

Provocando el corrimiento así como que los valores de la posición sean tan elevados, para lo cual es mejor utilizar presiones barométricas en vez de absolutas.

En esta ecuación será interesante no despreciar, los términos que en esta ocasión se omitieron, con el fin de facilitar la resolución y el análisis.

Por lo que en vez de usar presiones absolutas se recomienda utilizar presiones barométricas.

También se despreciaron varios términos que puede que afecten a la altura.

### Referencias:

- [1] Zill G. D , Wright S. W, Ecuaciones Diferenciales con problemas en la frontera, CENGAGE Learning México, Octava edición ,2013.
- [2] Ogata Kushimoto, Dinámica de sistemas, Prentice-Hall, México, primera edición, 1987
- [3] Turner L. J. M, Rocket and space propulsion, principles, practice and new developments, Praxis Publisher Springer, Germany,segunda edición 2006
- [4] Kraff, A. V., Vázquez G. S, Mijangos R. R. y Heredia-Cacino J. A., Obtención y solución de la ecuación de un cohete actuando sobre él las fuerzas externas a un campo gravitacional constante y el rozamiento del aire proporcional a la velocidad, Revista mexicana de física,61, 6-10. 2015,



# Robótica Educativa para la Comprensión y Aplicación de la Ley de Ohm

Campo Rincón Jaime Ernesto, Gutierrez Rios Ronald Saul

Universidad de la Sábana

## Resumen

*El presente artículo se busca describir cómo un ambiente de aprendizaje (AA) apoyado en un concurso de Robótica Educativa (RE) aporta a la comprensión y aplicación de la ley de Ohm en estudiantes de grado once de un colegio público de la ciudad de Bogotá. La metodología utilizada fue de tipo descriptivo con un enfoque cualitativo a través de un estudio de caso. Dentro de los resultados se determinó que el ambiente de aprendizaje aporta al fortalecimiento de procesos de comprensión y aplicación de la ley de Ohm, debido a que el concurso de robótica permite que el estudiante pase de la teoría a la práctica, estimule sus habilidades conceptuales, procedimentales, actitudinales y el desempeño social, al igual que se propician experiencias de aprendizaje motivadoras, significativas y vivenciadas. También se concluyó que el ambiente de aprendizaje apoyado en un concurso de robótica facilita el proceso de aprendizaje de conceptos básicos de la ley de Ohm por parte de los estudiantes, ya que la mayoría de ellos aumentó su nivel de comprensión y aplicación de la temática, reconociendo la relación que guardan las tres variables que la componen: voltaje, corriente y resistencia, y el comportamiento de estas en un circuito en funcionamiento realizando variaciones para la optimización de su robot*

**Palabras clave:** Robótica educativa, Ley de Ohm, ambiente de aprendizaje, constructivismo, trabajo colaborativo, aprendizaje significativo.

## 1. Introducción

Los enfoques pedagógicos soportados en los modelos didácticos tradicionales de aprendizaje, suelen con frecuencia ser insuficientes para enfrentar los desafíos que exige la enseñanza en la actualidad [1] para Castiblanco y Vizcaino [2] este tipo de enseñanzas han de dejarse de lado en la escuela, puesto que se debe preparar a los estudiantes para asumir la sociedad en la que viven.

Uno de los retos que enfrenta la educación actual es el acercar la tecnología a las aulas y que los colegios se sumen al desafío digital. Buscando empoderar a las escuelas en materias de programación y robótica, despertar el interés y desarrollar el pensamiento tecnológico en los jóvenes como un elemento vital del aprendizaje que apoya las áreas obligatorias [3].

En Colombia el MEN [4], propone como uno de los propósitos del área de tecnología para los grados décimo y undécimo “Diseño, construyo y pruebo prototipos de artefactos y procesos (como respuesta a necesidades o problemas), teniendo en cuenta las restricciones y especificaciones planteadas” (p. 25), por lo cual, es de particular interés para esta investigación estudiar la temática “ley de Ohm” que es indispensable a la hora de construir artefactos electrónicos.

Además porque la enseñanza de las ciencias es un proceso muy importante, puesto que permite a las personas conocer el mundo en que viven a través de los fenómenos físicos, químicos y naturales, razón por la cual el proceso de enseñanza y aprendizaje debe favorecer la construcción significativa del conocimiento, facilitar la conexión con la vida cotidiana, contextualizar la ciencia con diferentes áreas e interesar a los estudiantes en su estudio con el fin de mejorar la comprensión de la



naturaleza de la misma, “el currículo de ciencias es una de las vías a través de las cuales los alumnos deben aprender a aprender, adquirir estrategias y capacidades que les permitan transformar, reelaborar y en suma reconstruir los conocimientos que reciben” [5].

Así mismo, la incorporación de la robótica en el desarrollo de procesos pedagógicos es un recurso didáctico que facilita la construcción de nuevos conocimientos a través de la creación y de la integración de diferentes áreas del conocimiento curricular, además propicia el trabajo colaborativo, proporcionando a los educandos capacidades (cognitivas, sociales) para aprender de manera más agradable, sólida y duradera [6].

Al respecto la legislación colombiana propone el “diseño de currículos que garanticen el desarrollo de competencias, orientados a la formación de los estudiantes en cuanto a ser, saber, hacer y convivir, y que posibilite su desempeño a nivel personal, social y laboral” [7], por lo cual se hace importante educar a los estudiantes en el marco competencial e interdisciplinar, esto significa que ellos deben estar en la capacidad de asociar conceptos y procedimientos de diferentes áreas para la solución de problemas, preferiblemente contextualizados y que aporten a su desempeño en la vida cotidiana.

Lo anterior está alineado con la postura de Pozo [8], quien considera importante que los estudiantes puedan usar los conocimientos (en este caso la ley de Ohm) en la solución de problemas tanto de tipo cualitativo como cuantitativo, en los cuales pongan en juego razonamientos teóricos, reflexionen sobre sus conocimientos previos, analicen fenómenos concretos y estén en la capacidad de aplicarlos a momentos de la vida cotidiana. De igual forma, el proceso de enseñanza y aprendizaje debe tener presente la interacción en colectivos de estudiantes, lo cual propicia el fortalecimiento del lenguaje y los guía en la incursión de grupos con intereses científicos [2], también debe contemplar el aprendizaje significativo, esto es la activación de los conceptos previos, la motivación y el uso de recursos didácticos para estructurar procesos cognitivos y metacognitivos [9].

Bajo este contexto, el uso de la robótica cobra valor, puesto que es un medio de aprendizaje en el cual los estudiantes pueden diseñar y construir prototipos, convirtiéndose en una herramienta multidisciplinar que, además de trabajar sobre contenidos teóricos favorece la formación de otras competencias esenciales para el progreso académico de los estudiantes [10]. La robótica es una herramienta mediadora para lograr aprendizajes, ya que algunos contenidos científicos están relacionados con los roles que los robots pueden desempeñar, enlazando el proceso de enseñanza-aprendizaje [11]. También se considera pertinente insertar la robótica en los currículos escolares ya que promueve la transversalidad entre diferentes áreas del conocimiento y permite “generar ambientes de aprendizaje significativo, para así potenciar la adquisición de contenidos perdurables en el tiempo” [12].

## 2. Metodología

Se implementó un enfoque cualitativo pertinente para generar datos descriptivos provenientes del actuar de la población a investigar [13], ya que se buscó explorar las diferentes interacciones, comportamientos y avances de los estudiantes, para esto, se lleva a cabo la aplicación de instrumentos cuantitativos para establecer el nivel de apropiación de conceptos básicos de la ley de Ohm de los estudiantes después de implementar el ambiente de aprendizaje apoyado en Robótica.

El estudio se realizó a través de un estudio de caso, puesto que se seleccionó una población determinada, con la que se buscaba comprender las dinámicas presentes en su contexto propio [14], en esta investigación el caso lo constituyen los estudiantes con los que se implementó el ambiente aprendizaje, con quienes se recolectó información de las interacciones, las relaciones establecidas entre los participantes y el conocimiento adquirido. El objetivo de estudiar este caso fue el de observar y analizar un fenómeno relativamente desconocido y realizar aportes en el campo educativo [15]. Esto último lleva a indagar acerca de la forma en que se puede comprender y aplicar la ley de Ohm, que



durante años ha sido abordado de manera tradicional y del cual no se han dado conclusiones claras en el campo educativo.

### **2.1 Participantes**

La muestra está conformada por 37 estudiantes de un colegio público de la ciudad de Bogotá, entre los cuales se distinguen 15 hombres y 22 mujeres; el menor de los hombres tiene una edad de 15 años y el mayor tiene una edad de 18 años, en cuanto a las mujeres los rangos de edad están entre los 15 y los 17 años, son estudiantes que en su totalidad pertenecen a los estratos 3 y 4 de la localidad de Kennedy, Barrio Castilla y zonas aledañas en la ciudad de Bogotá.

### **2.2 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos**

Las técnicas que se emplearon para recopilar la actividad y comportamiento de los estudiantes involucrados en este estudio buscaron contar con diferentes puntos de vista, que permitieran analizar el objetivo propuesto, para esto se usaron técnicas cualitativas como la observación y encuesta y cuantitativas a través de una prueba de entrada y salida.

Para realizar la observación se usó el instrumento Diario de campo que permitió llevar un registro de anotaciones descriptivas del contexto en el que se lleva a cabo la intervención pedagógica, con el cual se busco reproducir, con la mayor exactitud posible, todos los eventos que ocurrieron en el aula, registrando aquello que podría ser potencialmente importante. Por lo cual además, de información objetiva también debería incluir información subjetiva [16]. Al finalizar cada sesión el investigador diligenció el diario de campo en torno a categorías y subcategorías previamente establecidas.

La encuesta se realizó a través de un cuestionario aplicado a los participantes por grupos de trabajo de acuerdo al AA (en total fueron 9 grupos). Éste instrumento permitió indagar la opinión de los estudiantes frente a la comprensión y aplicación de la ley de Ohm durante el ambiente de aprendizaje apoyado en el concurso de Robótica, sus percepciones y actitudes frente a los elementos del mismo. La siguiente tabla muestra la forma en que se codificaron los grupos y los integrantes que los componen (a cada estudiante se le asignó una o dos letras para nombrarlos).

**Tabla 1. Codificación de los grupos cuestionario.**

<b>Grupo</b>	<b>Codificación</b>	<b>Integrantes (Estudiantes)</b>
1	G1	A, G, R, AD
2	G2	D, K, T, U
3	G3	J, Z, AC, AJ
4	G4	B, C, N, Y
5	G5	H, Ñ, Q, AA
6	G6	E, P, V, W, AE
7	G7	I, O, AF, AG
8	G8	F, L, AH, AI
9	G9	M, S, X, AB

En cuanto a la prueba se aplicó antes de iniciar el trabajo con el AA y al finalizar el mismo, con el fin de comparar el conocimiento adquirido por los estudiantes. El instrumento contó con 15 situaciones problema dispuestas en un total de 16 preguntas, que buscaron indagar sobre la comprensión de los fundamentos teóricos de la ley de ohm (voltaje, corriente y resistencia) y la aplicación de esta para solución de problemas de circuitos eléctricos.

### **2.3 Métodos de análisis**

Los datos cualitativos recolectados en las encuestas y el diario de campo se analizaron utilizando el software QDA Miner. El proceso de categorización se orientó por el método que Cisterna



[17], el cual consiste en determinar tópicos a partir de los objetivos específicos de la investigación, que corresponden a categorías apriorísticas que a su vez contienen subcategorías.

El procesamiento y análisis de información se hizo a partir de estructuración de dos categorías las cuales fueron Ambiente de Aprendizaje - Concurso de Robótica y Aprendizaje de la ley ohm, con la finalidad de responder a la pregunta de investigación. A partir de las categorías, se plantearon subcategorías que permitieron caracterizar de manera más detallada la influencia de los elementos del ambiente de aprendizaje. Con base a esas categorías y subcategorías se realizó una revisión detallada con los datos recolectados a través de los instrumentos, los cuales permitieron obtener un panorama de lo que ocurrió al implementar el ambiente de aprendizaje (en la tabla N° 2 se pueden apreciar la descripción de las categorías y subcategorías a priori).

El propósito de establecer este tipo de análisis radicó en darle estructura a los datos [18], describir las experiencias del caso estudiado bajo la óptica de los participantes, en su lenguaje y con sus expresiones, comprender en profundidad el contexto que rodea los datos y encontrarles sentido en el marco del planteamiento del problema. Mientras que el proceso de análisis cuantitativo permitió soportar el análisis cualitativo a través de porcentajes, promedios y comparación de desempeños entre los estudiantes.

**Tabla 2. Categorías y subcategorías A priori.**

Categoría	Subcategoría
<p><b>AMBIENTE DE APRENDIZAJE - CONCURSO DE ROBÓTICA</b>                      Es un espacio en el que los estudiantes interactúan, para generar experiencias de aprendizaje significativo y con sentido, que son el resultado de actividades y dinámicas propuestas, acompañadas y orientadas por el docente.                      Un ambiente de aprendizaje facilitado por robótica crea las condiciones de construcción de conocimientos y permite su transferencia en diferentes campos del conocimiento (Ruiz, 2007).</p>	<p><b>Diseño y Gestión:</b>                      Es la forma en que se planea el acto educativo. Expresa el concepto que se tiene del acto de aprendizaje [19]. Hace referencia a las capacidades que se quieren desarrollar en el proceso de aprendizaje. También las particularidades del docente y los estudiantes en el proceso de enseñanza-aprendizaje. En esta subcategoría se contempla la forma en que se produce y usa el contenido como resultado del proceso de enseñanza-aprendizaje [9]. También a la forma que se evalúa y retroalimenta el conocimiento.</p>
	<p><b>Trabajo Colaborativo:</b>                      Hace referencia a la forma en que se da el proceso de aprender colaborativamente, haciendo una revisión de la forma en que los estudiantes expresan ideas, y como se produce el trabajo en equipo y la cooperación.</p>
	<p><b>Robótica Educativa:</b>                      Esta subcategoría busca conocer el impacto que genera la robótica en el proceso de enseñanza y aprendizaje. La presencia de la robótica en el aula de clase, ofrece a los estudiantes la posibilidad de entrar en contacto con la tecnología a través del manejo de robots y programas especializados, además genera interesantes y motivadores aprendizajes interdisciplinarios en donde pueden desarrollar nuevas habilidades y conceptos que le permiten dar respuesta eficiente al mundo actual [20].</p>
<p><b>APRENDIZAJE DE LA LEY OHM</b>                      Esta ley es importante para trabajar la temática electricidad, ya que involucra los tres parámetros eléctricos más usuales: voltaje, corriente y resistencia. La aplicación de la ley de Ohm en robots permite medir el nivel de comprensión del concepto por parte de los estudiantes involucrando el área de matemáticas, física y tecnología.</p>	<p>Revisión de los conceptos que tienen los estudiantes en cuanto a la ley de ohm antes de iniciar el trabajo con el ambiente de aprendizaje.                      Cual fue el proceso de aprendizaje que realizaron y cuales los conceptos aprendidos comparados con los conceptos previos.                      Revisión del proceso de Análisis de circuitos, la Comprensión y Aplicación de conceptos y la forma en que los estudiantes relacionan la teoría con el funcionamiento del robot.</p>



### 3. Ambiente de aprendizaje

El ambiente de aprendizaje mediado por TIC, fue diseñado con el objetivo de fortalecer la comprensión y aplicación de la ley de Ohm, a través de la participación en un concurso escolar de robótica al interior de la institución educativa Castilla IED, se desarrolló en seis sesiones con diferentes actividades pedagógicas que buscaron desarrollar las diferentes dimensiones del estudiante como ser integral, a través del conocer (conocimiento), hacer (procedimientos) y ser (actitudes) para esto el estudiante repasó, preparó, investigó y estudió conceptos como el voltaje, la corriente, resistencia, circuitos eléctricos y la ley de Ohm.

Con lo cual se promovió la aplicación de estos conocimientos en la solución de problemas de circuitos eléctricos, la realización de montajes en protoboard, midiendo voltajes y corrientes por medio de un multímetro, la propuesta de diversas soluciones a dificultades que se presentaran en el momento de poner a funcionar el robot y el día de la competencia; además se propició un ambiente de respeto y valor ante las opiniones de los compañeros, así como también la entrega de las tareas propuestas, a tiempo de forma ordenada e impecable.

El modelo pedagógico en el que se cimentó el ambiente fue el Constructivismo, porque Según Ferreiro [21] este permite que el conocimiento se desarrolle de una manera más amplia, además porque el ambiente también buscó desarrollar competencias para la vida -esto es saber conocer, saber hacer y saber ser-; en el constructivismo el aprendizaje es esencialmente activo ya que los estudiantes aprenden algo nuevo y lo incorporan a sus experiencias previas y a sus propias estructuras mentales, provocando una modificación constante del conocimiento [22].

Así mismo, a través de actividades constructivistas se buscó fortalecer una serie de habilidades tanto individuales como colectivas que permitieran que los estudiantes alcanzaran metas comunes y afines a través de la construcción de sus propios esquemas producto de su realidad, para la cual se propendió por el trabajo en grupos conformados desde la primera sesión del AA.

Mientras que se tomó como enfoque pedagógico el aprendizaje significativo, porque se extiende a su inserción en prácticas sociales con sentido, utilidad y eficacia, donde el estudiante debe manifestar una disposición para relacionar su conocimiento propio con el nuevo y articularlo de manera significativa bajo la interacción entre los diferentes participantes del acto educativo [23].

Además, el aprendizaje significativo priorizó el proceso de aprendizaje de los estudiantes, a través del desarrollo de la autonomía al proponer trabajos abiertos en cada sesión, de la motivación en cada sesión al proponer momentos en los que los estudiantes se acercaron al conocimiento usando herramientas TIC y poniendo en práctica el conocimiento, de la creatividad pues en cada sesión se posibilitó la creación de múltiples soluciones ante una situación propuesta y de la metacognición al realizar una comparación entre los conocimientos previos y los nuevos puestos en juego, para ello se usan los resultados de los entregables y la retroalimentación.

Por otro lado, el ambiente de aprendizaje se desarrolló en 6 sesiones donde 5 de estas se realizaron en el aula de tecnología e informática que cuenta con 40 portátiles cada uno con internet, 15 multímetros, 20 protoboards, 15 cautines, televisor 40" y una en el teatro del colegio. La tabla N° 3 muestra la secuencia didáctica seguida en el AA y la estructura de cada sesión.



**Tabla 3. Secuencia didáctica del ambiente de aprendizaje.**

Sesión	Actividad	Entregable	Lugar
1. La ley de Ohm	Los estudiantes resuelven una prueba de entrada para verificar conocimientos previos sobre la ley de ohm	Prueba de entrada individual	Aula de Tecnología e Informática
2. Robot seguidor de pared	Familiarización por parte de los estudiantes con los elementos que hacen parte de la construcción del robot		Aula de Tecnología e Informática
3. Montaje del Circuito	Los estudiantes montan el circuito del robot seguidor de pared en una protoboard	Circuito funcionando en la protoboard	Aula de Tecnología e Informática
4. Construcción y pruebas del robot seguidor de pared	Los estudiantes realizan el chasis del robot, montan el circuito y realizan pruebas de funcionamiento	Robot listo para realizar pruebas	Aula de Tecnología e Informática
5. Competencia de robots seguidores de pared	Los robots compiten entre sí para completar los recorridos de las cuatro pistas.	Robot participando en las cuatro pistas establecidas	Teatro
6. La ley de Ohm	Los estudiantes resuelven una prueba de salida para verificar los conocimientos sobre la ley de ohm después de la participación en el concurso de robótica	Prueba de salida individual	Aula de Tecnología e Informática

De otro lado, como estrategia de evaluación del aprendizaje en cuanto al proceso seguido por los estudiantes en el concurso de robótica, se emplearon rubricas que son una serie de valoraciones que permitieron el reconocimiento del aprendizaje, ellas contemplaron elementos del ser, saber y hacer, con el fin de evaluar integralmente a los estudiantes y se desarrollaron a través de la heteroevaluación, coevaluación y autoevaluación. La figura 1 muestra dos robots construidos por los estudiantes.



**Figura 1. Robots construidos por un grupo de estudiantes.**

## 4. Resultados

### 4.1 Categoría Ambiente de aprendizaje- Concurso de Robótica

El diseño de un ambiente de aprendizaje apoyado en un concurso propicia espacios de trabajo motivantes ya que la competencia impulsa a los estudiantes a superarse a sí mismos y a trabajar por ser mejores, así como también posibilita la puesta en práctica de conceptos provenientes de distintas disciplinas que se desarrollan a la par de las competencias como el liderazgo, el trabajo en equipo, la gestión de proyectos, la innovación y el emprendimiento [24]. Además los concursos escolares son un medio para mejorar y completar el aprendizaje, que permiten el desarrollo de la autoevaluación [25].

Respecto al uso del constructivismo y el aprendizaje significativo como herramientas pedagógicas para abordar el proceso de enseñanza aprendizaje, se evidenció que posibilitan a los estudiantes la construcción del conocimiento por sí mismos, la reflexión sobre sus saberes y la forma en que producen los conocimientos, esto a través de las actividades propuestas que les permiten hacer una modificación constante de conocimiento, contemplarlo como un elemento útil en la vida cotidiana y aprender un concepto (en este caso lo asociado a ley de Ohm) de manera motivante al enfocar a los estudiantes a cumplir con el objetivo de construir su robot seguidor de pared y hacerlo de la mejor forma, a través de metodologías diferentes.

En cuanto a la dimensión del hacer los estudiantes ponen en práctica el conocimiento adquirido sobre ley de Ohm, teniendo como base la planeación y evaluación de su proceso, haciéndolo de forma sistemática y reflexiva, con el fin de lograr los objetivos propuestos en el AA [26]. Por ende, usaron los conceptos para realizar los procedimientos que se requerían en la solución de los problemas propuestos, también al construir el circuito de cada robot seguidor de pared, al medir el voltaje y la resistencia, al verificar la corriente que le llega a los motores y graduar la resistencia con el potenciómetro.

Mientras que en el ser, el concurso de robótica permitió que los estudiantes pusieran en juego el valor de la responsabilidad e intercambiaron conocimientos con sus compañeros, creando una atmósfera adecuada para ejercer su saber y hacer. Esta dimensión jugó un papel determinante en la consecución de los objetivos del AA, ya que promovió la convivencia en el aula y al interior de los grupos de trabajo, haciendo que los estudiantes asumieran sus derechos y deberes, con responsabilidad, respeto por los demás [27], la figura 2 muestra el trabajo en equipo de los estudiantes.



Figura 2. Trabajo en equipo durante el ambiente de aprendizaje.



Por otro lado, el papel del docente y de los estudiantes fue determinante en la gestión del concurso de robótica y por ende en la construcción del concepto de la ley de Ohm y su aplicación, a partir del rol que cumplió cada uno fue posible identificar su aporte en la construcción del conocimiento.

Se evidenció que el rol principal del docente en un ambiente de aprendizaje que busca fortalecer la comprensión de la ley de Ohm fue el de ser mediador y líder transformador. Principalmente planificó las herramientas para potenciar el aprendizaje, aspecto que le permitió orientar a los estudiantes a cumplir con el objetivo de cada momento del AA. También se destaca el hecho de que usó metodologías y recursos diferentes a los empleados en la cotidianidad de su clase, con los cuales apoyó el aprendizaje, la aplicación de conceptos, contribuyó en la aparición de un clima de confianza, comunicación, respeto y aceptación entre los estudiantes.

En cuanto a los estudiantes, se determinó que al trabajar con el ambiente de aprendizaje asumieron un rol de autonomía frente a su aprendizaje, se evidenció gran expectativa e interés por aprender ya que les resultó motivante trabajar la ley de Ohm haciendo uso de la robótica educativa, generándose una actitud positiva hacia las mismas, lo cual es relevante para lograr un aprendizaje significativo [28]. Al compartir ideas y construcciones los estudiantes potencian habilidades matemáticas y tecnológicas que les permiten interactuar con sus compañeros, ayudar a los que tienen preguntas y discutir aprendizajes con sus pares. Ellos están en la capacidad de gestionar, adquirir, transformar y aplicar los conocimientos que se presentan [29] asumiendo un rol de autonomía frente a su aprendizaje, mostrando expectativa e interés por aprender, ya que lograron usar conceptos (que dan muestra de la comprensión de la ley de Ohm), realizar procedimientos razonados y resolver problemas a través del diseño, construcción y exposición de su robot seguidor de pared, en la figura 3 se evidencia a los estudiantes haciendo pruebas en una de las pistas de su robot



**Figura 3. Pruebas del robot.**

De otro lado, el proceso de evaluación es determinante en la comprensión de un conocimiento, puesto que de este depende enriquecer el proceso de enseñanza aprendizaje [30]; permite conocer fortalezas y aspectos a mejorar de los estudiantes, con lo cual se puede determinar el estado de los mismos en cuanto a la comprensión de la ley de Ohm, y la forma en que la aplican para construir el robot. Además, la posibilidad de autoevaluarse y coevaluarse resulta interesante para los estudiantes, brindándoles la posibilidad de hacerse responsables de su aprendizaje y valorar su desempeño y el de sus compañeros, para Medina et al. [31] al verse la evaluación como un proceso en el que son válidas las interacciones sociales, el grupo se convierte en una comunidad, de tal forma que la evaluación cumple una función social al unir el grupo y permitirle ser participe en el proceso y una función pedagógica al conocer los procesos seguidos por los estudiantes al trabajar de manera individual y grupal y reconocer fortalezas y debilidades.



Mientras que la retroalimentación facilita el seguimiento continuo al proceso de los estudiantes, fortalece la posibilidad de que ellos contrasten el conocimiento puesto en juego y cumplan con el objetivo del ambiente de aprendizaje, para Ríos [32] “la retroalimentación debe buscar que los estudiantes visualicen sus logros en cada actividad realizada, de esta manera pueden corregir o introducir todo aquello que ayuda a consolidar su aprendizaje” (p. 87).

En cuanto a la subcategoría trabajo colaborativo se encontró que aporta a la comprensión y aplicación de la ley de Ohm, ya que el aprendizaje a través de grupos permite que los estudiantes trabajen en la tarea propuesta hasta que han aplicado y comprendido los conceptos de la ley de Ohm, aprendiendo así a través de la cooperación [33]. Al trabajar en grupo los estudiantes son capaces de aportar sus recursos y habilidades en un equipo [34]. Sin embargo, existieron deficiencias en algunos grupos que no tomaron conciencia sobre la responsabilidad y el rol que cumple cada uno de los integrantes, generándose atrasos e incumplimiento en las entregas y actividades propuestas, es importante seguir trabajando en actividades que permitan superar las dificultades.

Se determinó que las actividades propuestas favorecen el trabajo en equipo y la colaboración “comenzando por la conformación eficiente y eficaz de grupos de trabajo, la interacción positiva base fundamental de la comunicación asertiva y el trabajo en equipo en pro de la gestión de conocimiento” [36] puesto que se pusieron en juego habilidades interpersonales que permitieron realizar discusiones respetuosas en las que la comunicación jugó un papel indispensable como herramienta de construcción de conocimientos asociados a la ley de Ohm.

También se encontró que al trabajar bajo la modalidad de un AA apoyado en un concurso los estudiantes ponen en juego distintos elementos propios del trabajo colaborativo, como la posibilidad de compartir ideas y conocimientos, la interacción efectiva, trabajar de forma armoniosa en equipos diversos, la responsabilidad y la perseverancia para culminar las tareas [35].

Mientras que en la subcategoría Robótica Educativa los hallazgos mostraron que a través de ella los estudiantes pueden generar su propio aprendizaje, ya que encuentran los contenidos y las actividades dinámicas, atractivas e interesantes, generando una gran interactividad que hace referencia a la posibilidad de expresar ideas y comunicarlas, así como también el uso de los contenidos para cumplir con los objetivos propuestos [24] al diseñar el Robot seguidor de pared. Pues con este artefacto los participantes dejaron de lado el aprendizaje tradicional por un conocimiento práctico en donde usaron diferentes herramientas. Así mismo, el uso de la robótica en el aula permitió la interdisciplinariedad al aplicar conceptos que se abordan desde diferentes áreas propiciando un trabajo integrador [36].

En cuanto a la construcción de los proyectos, la RE permite planear y ejecutar los tiempos del proceso de diseño y desarrollo del mismo y ayuda a identificar los puntos fuertes y las debilidades, para poder tomar decisiones que favorezcan la ejecución y que garanticen resultados. Además, al construir un robot educativo, el estudiante desarrolla sus propias estrategias de resolución de problemas [37], de igual forma la RE, promueve la autorreflexión y valoración del proceso de aprendizaje [38], aspecto que se pudo apreciar a lo largo del AA. También contribuyó a que los estudiantes comprendieran mejor los conceptos y que en cierta medida fueran autónomos ya que no dependieron completamente del docente, pues diseñaron sus prototipos a partir de lo aprendido y poniendo en juego sus ideas y conceptos. Al respecto se resalta la forma en que la RE incentiva la creatividad ya que permite pensar en diferentes estrategias y soluciones e imaginar cómo concretarlas en abstracto [39].

#### **4.2 Categoría Aprendizaje de la Ley Ohm**

El ambiente de aprendizaje apoyado en un concurso de robótica permitió que los estudiantes adquirieran diversos tipos de aprendizaje relacionados con la apropiación de conceptos básicos de la ley de Ohm, la mayoría de ellos aumentó su nivel de comprensión y aplicación de la temática, como se puede apreciar en la figura N° 1, en donde se observa un avance significativo en la prueba de salida, en donde sólo el 2,8% (equivalente a un estudiante) estuvo en un nivel bajo, el 86,4% de los



estudiantes alcanzo un nivel medio y el 10,8% alcanzó un nivel superior. Con esto se puede asegurar que el ambiente de aprendizaje propició que los estudiantes mejoraran su nivel de apropiación y comprensión de la ley de Ohm, reconociendo la relación que guardan los tres parámetros eléctricos más usuales: voltaje, corriente y resistencia.

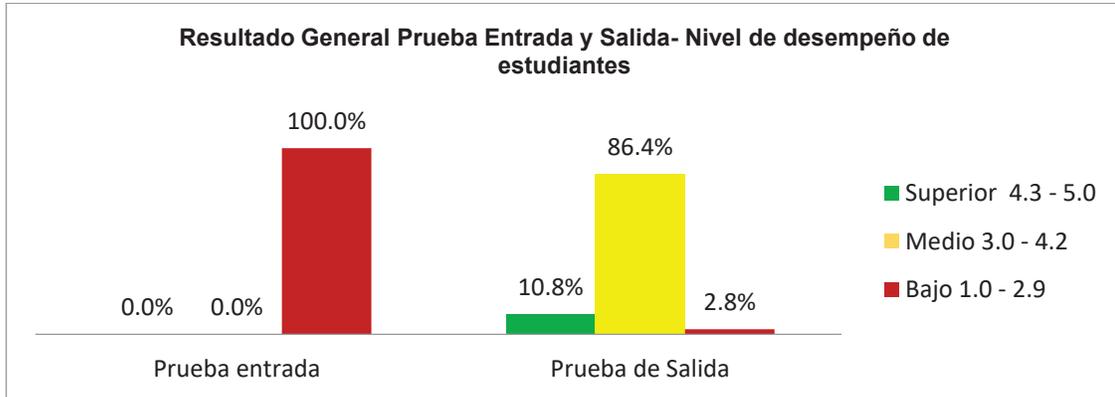
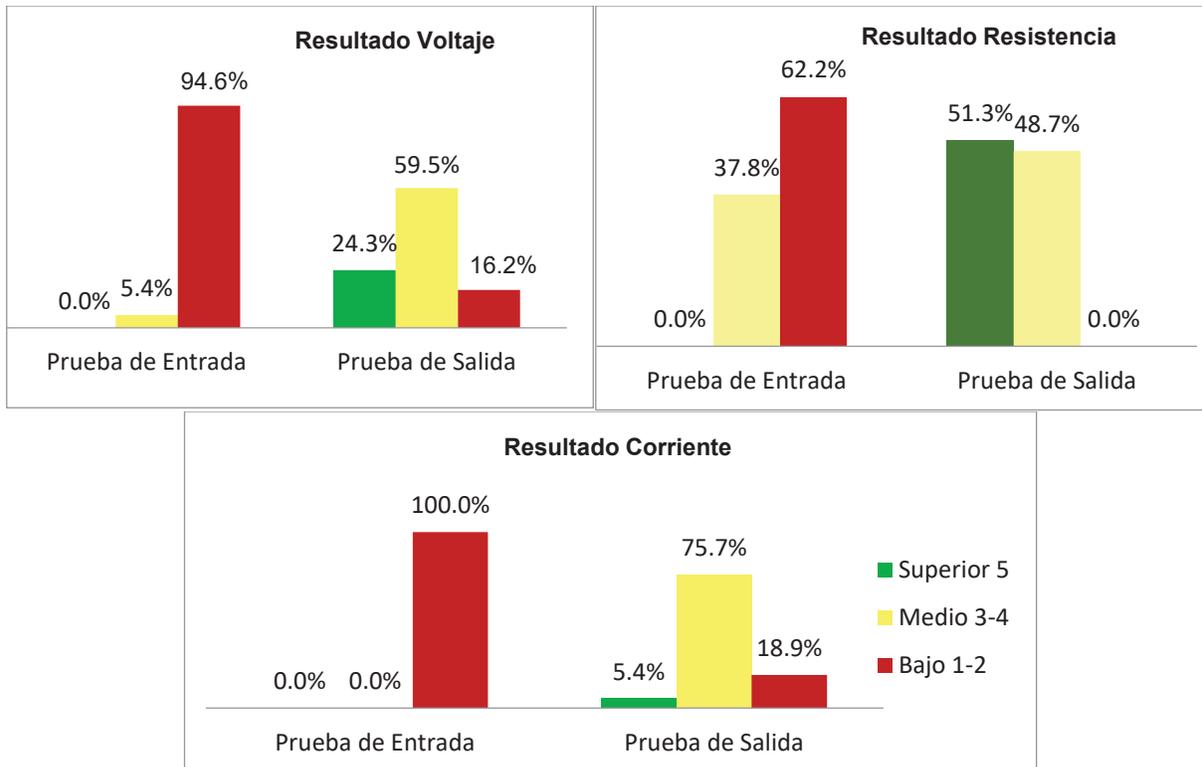


Figura 1. Niveles de desempeño de estudiantes prueba de entrada y salida.

En cuanto a cada uno de los elementos que conforman la ley de Ohm, se encontró que la resistencia fue la que mayor comprensión tuvo por parte de los estudiantes en la solución de problemas, seguido por el voltaje y finalmente la corriente. En la figura 2 se puede observar el nivel de comprensión de los estudiantes en cada uno de los elementos de la ley de Ohm.

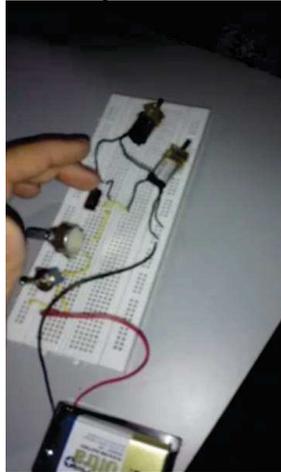




**Figura 2. Niveles de desempeño de estudiantes en cuanto a los elementos de la ley de Ohm- prueba de entrada y salida.**

La aplicación del concepto de Voltaje para la construcción del robot seguidor de pared dio muestra de que los estudiantes entendieron que este indica la energía eléctrica necesaria para mover el motor y que es importante conocer el voltaje de operación del motor ya que si se aplica un voltaje muy bajo este no se moverá, pero si se aplica un voltaje superior al necesario se generan daños. Los estudiantes lograron comprender la importancia del voltaje como elemento que impulsa a los electrones a través de un conductor en un circuito cerrado, esto para que los electrones sean capaces de llegar a un punto determinado [40]

Mientras que en relación al concepto de resistencia, se puede determinar que el ambiente de aprendizaje contribuye a que los estudiantes comprendan la importancia del mismo para dar una mejor potencia a un circuito eléctrico, también que esta propiedad hace que el objeto resista u oponga al paso de una corriente eléctrica y saber cuánta corriente fluye en el circuito cuando se le aplica un voltaje determinado, la figura 4 muestra el trabajo sobre el circuito verificando el funcionamiento.



**Figura 4. Pruebas del circuito.**

Con el concepto de corriente, se presentaron mayores dificultades de comprensión por parte de los estudiantes a la hora de resolver problemas, sin embargo reflejo avances significativos al terminar las sesiones. Esto refleja que el concepto de corriente al iniciar el ambiente de aprendizaje no era claro para ningún estudiante y que al trabajar con el AA se evidenció progreso relevante en la comprensión de la corriente como elemento de la ley Ohm, pues los estudiantes lograron calcular la cantidad de corriente que circula por un circuito, relacionar la resistencia y el voltaje para hallarla y aplicar el concepto de corriente a situaciones de la vida cotidiana; además, para la construcción del robot seguidor de pared los estudiantes entendieron cuál era la cantidad de corriente que requería el motor de la fuente de alimentación para que pudiera operar.

Además, para la construcción del robot seguidor de pared los estudiantes entendieron que la resistencia servía para regular la velocidad del motor, haciendo que este tenga la velocidad deseada, de igual forma lograron comprender que la resistencia en el circuito toma la energía de una fuente (como la pila) y la distribuye regulando la potencia de la misma.

Por otra parte, en el proceso de aprendizaje se concluye que el ambiente de aprendizaje potencia el uso de terminología técnica propia de las ciencias y la tecnología, también posibilita a los estudiantes reconocer los aprendizajes conceptuales adquiridos y aplicar los conceptos en la construcción del robot (específicamente del circuito del mismo) y en la solución de problemas.

El uso de diversas herramientas e instrumentos potenciaron la comprensión y aplicación de la ley de Ohm, dichos objetos son operadores tecnológicos, como engranajes, motores, pilas, voltímetro, amperímetro y la fuente de alimentación, los cuales despiertan la curiosidad del estudiante



y lo pueden llevar a pensar en diferentes proyectos, a partir de los cuales se pueden hacer construcciones más complejas [41].

## 5. Conclusiones

En la presente experiencia se llevó a cabo un concurso de robótica donde el objetivo paso de ser un objetivo competitivo a un objetivo pedagógico, no implicando el olvido de la competencia, sino destacando una finalidad de aprendizaje en los estudiantes. Como resultado se observó que los estudiantes lograron aprender los conceptos básicos de la electricidad, fuera del aula de clase, abandonando la cátedra tradicional y en cambio aplicando directamente un proyecto. Aunque muchos de los contenidos tienen altos niveles de dificultad, la exploración directa de los estudiantes con los componentes y la motivación generada por la competencia llevó a muchos estudiantes a pasar de una actitud pasiva, a buscar proactivamente los conocimientos para hacer que su robot fuera el mejor.

Mediante un proyecto de robótica el proceso de enseñanza y aprendizaje se desarrolla de una forma más interactiva, social, motivadora y con mayores resultados, los estudiantes logran mejorar su trabajo en equipo, así como también posibilita la interdisciplinariedad al integrar áreas como la física, matemáticas y tecnología, pues es una forma innovadora de llevar el conocimiento al aula acercando al estudiante al conocimiento por medio de herramientas tecnológicas.

Pedagógicamente, el juicioso diseño e implementación de un ambiente aprendizaje fundamentado en el aprendizaje significativo permitió la exploración y puesta en práctica de diferentes elementos de enseñanza para potenciar el aprendizaje, como el uso de conceptos previos, la metacognición, la autonomía, la creatividad, el saber asociado a la formación integral (conceptual, procedimental y actitudinal).

También, es importante considerar el efecto positivo que genera en los estudiantes el trabajar los conceptos físicos asociados a la ley de Ohm a través de un concurso de Robótica, puesto que para ellos es enriquecedor el hecho de aplicar conocimientos que generalmente se estudian de manera teórica en un artefacto como el robot seguidor de pared que construyeron durante el ambiente de aprendizaje, lo cual hace el aprendizaje interactivo y permite que los educandos ejemplifiquen y expliquen los conceptos.

## Referencias

- [1] Ministerio de Educación Nacional. *“Integrar los medios de comunicación al aprendizaje”*. Al tablero, 2, 2-32, 2005.
- [2] Castiblanco, O y Vizcaíno, D. *“El uso de las TICs en la enseñanza de la física”*. Ingenio Libre, 20-26, 2008.
- [3] Fundación telefónica. *“Robótica y Programación en las aulas”*, Fundación telefónica. España, 2016. Recuperado de [http://www.fundaciontelefonica.com/educacion\\_innovacion/concurso-nacional-robotica-programacion/](http://www.fundaciontelefonica.com/educacion_innovacion/concurso-nacional-robotica-programacion/)
- [4] Ministerio de Educación Nacional. *“Orientaciones generales para la educación en tecnología. Ser competente en tecnología: una necesidad para el desarrollo”*, MEN, Colombia, 2008.
- [5] Gómez, M & Pozo, J. *“¿Por qué los alumnos no aprenden la ciencia que se les enseña?”*, Morata, México, 2006.
- [6] Ausubel, D. *“La psicología del aprendizaje verbal significativo”*. Grune and Stratton, Estados Unidos, 2002.
- [7] Ministerio de Educación Nacional. *“Estándares Básicos de Competencias en Lenguaje, Matemáticas, Ciencias y Ciudadanas”*, MEN, Colombia, 2006.
- [8] Pozo, J. *Aprender y enseñar ciencia. Del conocimiento cotidiano al conocimiento científico*. Morata, España, 2006.



- [9] Díaz, F. y Hernández, G. *“Estrategias docentes para un aprendizaje significativo. Una interpretación constructivista”*, Mcgraw-Hill, Mexico, primera edición, 2002.
- [10] López, L. *Robótica Educativa: Recuperando la alegría por el aprendizaje y la investigación en ciencia y tecnología*. Para el aula, 7, 13-14, 2012.
- [11] Patiño, K., Curto, B., Moreno, V., Rodríguez, J. *“Uso de la Robótica como Herramienta de Aprendizaje en Iberoamérica y España”*, Vaep-Rita, 2,1, 41-48, 2014
- [12] Peña, M. *“Aprendizaje Significativo y Robótica Pedagógica en 4to. Grado de Educación Básica”*. (Tesis de maestría). Universidad Católica Andrés Bello, Venezuela, 2007
- [13] Taylor, S. y Bogdan, R. *“Introducción a los métodos cualitativos de investigación”*. Paidós, España, tercera edición, 1998.
- [14] Eisenhardt, K. *“Building Theories from Case Study Research”*. Academy of Management Review, 532-550, 1989.
- [15] Stake, R. *“Investigación con estudio de casos”*. Morata, España, tercera edición, 2005.
- [16] McKernan, J. *“Investigación-acción y currículum: métodos y recursos para profesionales reflexivos”*. Morata, España, primera edición, 1999.
- [17] Cisterna, F. *“Categorización y Triangulación como procesos de validación del conocimiento en investigación cualitativa”*. Theoria, 14,1, 61-71, 2005.
- [18] González, F., y Castro, E. *“Investigación cualitativa asistida por ordenador en economía de la empresa”*. Investigaciones europeas de dirección y economía de la empresa, 11, 2, 45-58, 2005.
- [19] Herrera, M. *“Consideraciones para el diseño didáctico de ambientes virtuales de aprendizaje: una propuesta basada en las funciones cognitivas del aprendizaje”*. Universidad Autónoma Metropolitana, México, 2006.
- [20] Barranco, A. *“La robótica educativa, un nuevo reto para la educación panameña. Teoría de la Educación”*. Educación y Cultura en la Sociedad de la Información. Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, 13, 2, 9-17, 2012.
- [21] Ferreiro, R. *“Más allá de la teoría: El aprendizaje colaborativo: El constructivismo”*. Trillas, México, 2005
- [22] Abbott, J. *“Constructing Knowledge, Reconstructing Schooling”*. Educational Leadership, 66-69, 1999.
- [23] Pérez, A. *“¿Competencias o pensamiento práctico?”*. La construcción de los significados de representación acción”. Morata, España, 2008.
- [24] Barak, B. y Zadok, Y. *“Robotics projects and learning concepts in science, technology and problema solving”*. International Journal of technology and design education, 19,3, 289- 307, 2007.
- [25] Festinger, L. *“A theory of social comparison processes”*. Human Relations, 7, 117-40, 1954.
- [26] Aramendi, P. *“Las Competencias para el Desarrollo Integral”*. Gakoa.España, 2008.
- [27] Delors, J. *“La educación encierra un tesoro”*. Santillana, España, Segunda edición, 1996.
- [28] Pierce, R., Stacey, K. y Barkatsas, A. *“A scale for monitoring students’ attitudes to learning mathematics with technology”*. Computer and Education, 48, 285-300, 2007.
- [29] Gros, B. *“La formación del profesorado como docente en los espacios virtuales”*. Revista iberoamericana de educación, 1-14, 2000.
- [30] Clark, B. *“El sistema de educación superior. Una visión comparativa de la organización académica”*. UAM, México, 1992.
- [31] Medina, B., González, D., Flórez, D., Otero, M. y Chávez, G. *“Evaluación para matemáticas”*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2013.
- [32] Ríos, W. *“Retoolimentaciones usando una pizarra electrónica”*. Revista mexicana de bachillerato a distancia, 3, 6, 1-6, 2011.
- [33] Glinz, P. *“Un acercamiento al trabajo colaborativo”*. Trillas, México, 2005.
- [34] Acosta, M.; Forigua, C. & Navas, M. *“Robótica Educativa: un entorno tecnológico de aprendizaje que contribuye al desarrollo de habilidades”* (Tesis de Maestría). Pontificia Universidad Javeriana, Colombia, 2010.
- [35] Gutiérrez, M. *“El trabajo cooperativo, su diseño y su evaluación. Dificultades y propuestas”*. Girona, 1-9, 2009.
- [36] Rost, A. *“Pero, ¿de qué hablamos cuando hablamos de Interactividad?”*. Center for Civic Journalism, 2, 1- 32, 2001.



- [37] Parra, C.; Bravo, A & García, L. “*Generación de ambientes de aprendizaje interdisciplinarios con robótica en instituciones educativas de bajos recursos económicos*”. Pontificia universidad Javeriana, Colombia, 2003.
- [38] Bers, M.; Rogers, C.; Beals, L.; Portsmore, M.; Staszowski, K.; Cejka, E.; Carberry, A.; Gravel, B.; Anderson, J. y Barnett, M. “*Innovative session: early childhood robotics for learning*”. International Society of the Learning Sciences, 1036-1042, 2006.
- [39] Candelas, F.; Torres, F.; Gil, P.; Ortiz, P.; Puente, S. y Pomares, J. “*Laboratorio Virtual Remoto para Robótica y Evaluación de su Impacto en la Docencia*”. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 1, 2, 49-57, 2004.
- [40] Martín, I. “*Física General*”. Tebar, España, edición 32, 2003
- [41] Papert, S. “*Desafío de la mente*”. Ediciones Galápagos, Argentina, primera edición, 1987.

## **Innovaciones en 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 CD, pp. 490, Tamaño: 35 Mb.

ISBN: 978-607-9394-11-0

## **SOBRE LOS AUTORES:**



**Juan Manuel Ramos Arreguín.** Doctorado en Ciencia y Tecnología, con especialidad en Mecatrónica (2008). Maestría en Ingeniería Eléctrica en la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica (FIMEE). Ingeniero en Electrónica egresado de la FIMEE. Presidente de la Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. Profesor Titular de Tiempo Completo en la Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Informática. Pertenece al SNI del CONACYT nivel 1. Profesor perfil PRODEP. Experiencia docente: 27 años.



**José Emilio Vargas Soto.** Postdoctorado por la Universidad de Telecomunicaciones de Tokio, Japón. Doctorado en Ciencias Físicas con especialidad en Informática y Automática por la Universidad Complutense de Madrid. Maestría Tecnologías de la Información en Fabricación por la Universidad Politécnica de Madrid. Licenciatura en Ingeniería Mecánica y Eléctrica por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Profesor Titular de Tiempo Completo. Presidente del Capítulo de Computación Inteligente IEEE-Querétaro. Senior member del IEEE. Profesor perfil PRODEP. Pertenece al SNI del CONACYT Nivel 1. Experiencia docente: 28 años.



**Carlos Alberto Ramos Arreguín.** Obtuvo su título de Ingeniero en Computación (2010) y el grado de Maestro en Ciencias especialidad Computación (2013) por la Universidad de Querétaro. Actualmente realiza sus estudios de doctorado en Ciencias en el área de Computación, en la Universidad Autónoma de Querétaro. Sus líneas de interés son: procesamiento digital de imágenes, diseño y desarrollo de sistemas computacionales en sistemas embebidos, procesamiento de señales, programación web y de dispositivos móviles, tecnología de microcontroladores y FPGA.





## Fe de erratas

En la página 419, el penúltimo párrafo debe decir:

### ***3.3 Cálculo de las ganancias del controlador PID con la ganancia y margen de fase***

En esta sección se utiliza un algoritmo que sintoniza la ganancia y margen de fase exactos, por medio de la función transferencia en lazo abierto. Así de esta forma alterna, se determinaron las ganancias del controlador PID del sistema modelado, utilizando el algoritmo descrito en [20], la idea es sintonizar los valores de las ganancias de tal forma que se obtengan la ganancia y margen de fase que cumplan las igualdades de la ley de control. Debido a la forma como se obtiene el modelo que se describió en la sección 2.3, las raíces de la ecuación característica (polos) indican que el sistema identificado es lineal, con polos dominantes cerca del origen.